

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte
Lietišķo datorsistēmu institūts

Aleksejs Jurenoks
Doktora studiju programmas „Datorsistēmas” doktorants

**BEZVADU SENSORU TĪKLA DZĪVES
ILGUMA NOVĒRTĒŠANAS MODEĻA
UN METOŽU IZSTRĀDE UN IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr.habil.sc.ing., profesors
LEONĪDS NOVICKIS

Rīga 2016

Jurenoks A. Bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeļa un metožu izstrāde un izpēte. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2016. – 55.lpp.

Iespiest saskaņā ar LDI 2016. gada 03. februāra lēmumu, protokols Nr. 12300-4.1/1

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DATORSISTĒMU
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ
UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu datorsistēmu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2016. gada 06. jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultātē, Rīgā, Sētas ielā 1, 202. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI:

Valērijs Zagurskis
Profesors, Dr.habil.sc.comp.
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Arnis Cīrulis
As. Profesors, Dr.sc.ing.
Vidzemes Augstskola, Latvija

Krzysztof Amborski
As. Profesors, Dr.sc.ing.
Varšavas tehnoloģiskā universitāte, Polija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Aleksejs Jurenoks..... (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 59 zīmējumus un ilustrācijas, 10 tabulas, kopā 156 lappuses. Literatūras sarakstā ir 130 avoti.

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

ACL	Apstiprinājuma saņemšanas stāvoklis
BST	Bezvadu sensoru tīkls
CCA	Kanāla noklausīšanās stāvoklis
FFD	Full Function Device pilnībā funkcionējošas ierīces
GMRE	Greedy Maximum Residual Energy algoritms
KPFI	Klimata pārmaiņu finanšu instruments
MRE	Maximum Residual Energy
MREML	Maximum Residual Energy Maximal Lifetime
RFD	Reduced Function Device ierīces ar samazinātu funkcionalitāti

APZĪMĒJUMU SARAKSTS

E_0	Sākotnēja baterijas enerģija
E_{np}	Viļņu laukuma amplitūda
C_k	Lietotāja definēta zemākā robeža koeficientam Q_k
G	Viļņu pastiprinājuma koeficients
h_1, h_2	Radiosakaru antenas atrašanās augstums
I_i	Plūsmas datu intensitāte
L	Pakešu skaits bitos
O	Dienesta laukuma izmērs bitos
P	Retranslatora jaudas koeficients
P_a	Vidējā maršrutētāja patērētā enerģija, saņemot informāciju no sensoriem
P_{tx}	Vidējā patērētā enerģija sūtīšanas režīmā [W]
P_s	Vidējā patērētā enerģija gulēšanas režīmā [W]
P_{rx}	Vidējā patērētā enerģija saņemšanas režīmā [W]
r	Radiosakaru attālums
r_a	Laiks, informācijas saņemšanai no sensoriem
s	Koordinatoru skaits tīklā
T	Laika intervāls, kurā darbojas sistēma
t_s	Laiks, cik sistēma atrodas gulēšanas režīmā
t_i	Laiks, kas ir nepieciešams informācijas saņemšanai no viena termināla
t_{tx}	Laiks, kas ir nepieciešams informācijas nosūtīšanai tīklā
V_n	Tīkla mezglu kopa
λ	Viļņa garums.

SATURS

IEVADS.....	6
1. BEZVADU SENSORU TĪKLA DZĪVES ILGUMA PALIELINĀŠANAS PROBLĒMAS, ESOŠĀS SITUĀCIJAS ANALĪZE. SISTĒMAS ARHITEKTŪRA	12
Bezvadu sensoru tīklu pētījumu apskats	12
Enerģijas balansēšanas metožu grupas izmantošanas iespējas	14
Bezvadu sensoru tīkla dzīves cikla modelēšanas laikā izmantotās metodes.....	15
2. BEZVADU SENSORU TĪKLA DZĪVES ILGUMA NOVĒRTĒŠANAS MODEĻA IZSTRĀDE.....	15
BST dzīves ilguma novērtēšanas modeļa metožu un modeļu mijiedarbība.....	15
Sensoru tīkla mezglu enerģijas patēriņu ietekmējošie faktori.....	16
Termināla dzīves ilguma novērtēšana	17
Maršrutētāja dzīves ilguma novērtēšana	18
Tīkla mezglu izmantotās jaudas ietekmējošo faktoru novērtēšanas modeļa komponents	19
Tīkla dzīves ilguma ietekmējošo faktoru noteikšanas modeļa komponents	21
Bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeļa izmantošanas algoritms	22
3. BEZVADU SENSORU TĪKLA PĀRKONFIGURĒŠANAS METODES IZSTRĀDE ..	26
Bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metodes un algoritmu mijiedarbība	26
Dinamiskā koordinatora mezgla vadības metode	26
Datu plūsmas vadības metode	27
Virtuālā koordinatora vadības metode ar heuristisko algoritmu	29
4. UZ MODELĒŠANAS BALSTĪTA BEZVADU SENSORU TĪKLA DZĪVES ILGUMA NOVĒRTĒŠANAS MODEĻA UN METOŽU EKSPERIMENTĀLA VALIDĀCIJA	31
Bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu eksperimentālā aprobācija, izmantojot fizisko tīklu.....	31
Fizisko eksperimentu laikā iegūto rezultātu apkopojums	39
Bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu imitācijas modelēšana	39
Imitācijas modelēšanas laikā iegūto rezultātu apkopojums	45
DARBA KOPĒJIE REZULTĀTI, SECINĀJUMI UN TURPMĀKIE PĒTĪJUMI	45
BIBLIOGRĀFISKAIS SARAKSTS	48

IEVADS

Ikdienā palielinās dažādu ierīču skaits, kas, izmantojot datora tīklus, savā starpā nodrošina informācijas mijiedarbību. Pēdējā laikā palielinājies sistēmu skaits, kas neprasa cilvēka iejaukšanos sistēmas darbības procesā (Machine-to-Machine communication).

Saskaņā ar “lietiskais internets” (Internet of things) koncepciju līdz 2019. gadam globālajā tīmeklī tiks saslēgti vairāk nekā daži triljoni telekomunikāciju ierīču [COL 2015], kuru lielāko daļu, saskaņā ar Starptautisko elektrosakaru savienības Y.2069 doto rekomendāciju [TER 2015], veidos “lietas” sistēmas. Lai telekomunikācijas ierīces varētu mijiedarboties savā starpā vai darboties, izpildot lietotāja instrukcijas, ierīcēs ir iekļauti dažādi sensoru mezgli, kas var, ne tikai nolasīt informāciju par apkārtējo vidi, bet komunicēt savā starpā, izmantojot tīkla protokolus.

Pēdējā laikā lielu popularitāti atgūst mazjaudīgas skaitļošanas sistēmas. Šodienas tehnoloģijas ļauj samazināt esošās skaitļošanas sistēmas izmēru, radot nedārgu, mazjaudīgu autonomo sistēmu, kas dod iespēju izmantot gan fiziskos, gan bezvadu tīklus informācijas pārraidei. Lielāko popularitāti šī veida tehnoloģija guva informācijas saņemšanai no sensoriem un kontroles sistēmu jomā. Tīkli, kas izmanto mazjaudīgas skaitļošanas sistēmas un pārraida datus, izmantojot bezvadu savienojumu, ir saukti par bezvadu sensoru tīkliem, kuru galvenais uzdevums ir informācijas saņemšana no sensoriem un to pārraidīšana tīklā.

Bezvadu sensoru tīkla pirmsākumi ir minēti 1999. gadā, kad pirmajā publikācijā [KOM 2012] tika minēta iespēja izmantot mazjaudīgas sistēmas informācijas iegūšanai dabā. Attīstoties tehnoloģijai, tā ieguva plašu pielietojumu ne tikai vides parametru monitoringa jomā, bet arī medicīnā [STA 2005, BAB 2010, KYP 2011], apsardzes un drošības sistēmās [RAM 2012], kā arī izsekošanas uzdevumos [THE 2015].

Eksistē virkne nestandartu risinājumu, kuros dažreiz netipiskā veidā ir pielietots bezvadu sensoru tīkls – multimediju datu pārraidīšana [BAR 2004], inerces sensoru datu apstrāde izsekošanas sistēmās [BAB 2010], objektu kustības noteikšana un monitorings.

Pēdējā laikā palielinās aplikāciju skaits, kas piedāvā izmantot mobilās ierīces kompleksas informācijas saņemšanai. Starp visvairāk attīstītākajām mobilo bezvadu sensoru tīkla aplikācijām var izcelt zemūdens monitoringa sistēmas [GOY 2009], objektu atrašanās vietas kontroles sistēmas telpā [THE 2015, IEE 2015] un pēdējā laikā plaši attīstītās personālās barometriskās sistēmas.

Šodien aktuālākie bezvadu sensoru tīkla pētījumi ir balstīti uz jauno tīkla pārraides protokolu uzlabošanu [MIE 2012, TAR 2014], pārraides maršrutēšanu [KOM 2012] un tīkla darbības struktūras veidošanu [KYP 2011], kas dod iespēju palielināt kopējo bezvadu sensoru tīkla dzīves ilgumu.

Tēmas aktualitāte

Pēdējā laikā ir palielinājies pētījumu skaits, kuri ir saistīti ar bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma palielināšanas problēmām. Mūsdienīgus pētījumus var sadalīt divās kategorijās:

- Pētījumi, kas ir saistīti ar datu plūsmas modelēšanu un optimizāciju [YOU 2004, SIN 2010, MIS 2009]. Šeit jāuzsver, ka BST plūsmas pārraidē ir atkarīga no tīkla pielietojuma un tīkla darbības scenārija. Eksistē sistēmas, kurās pārraidītās informācijas frekvence un lielums ir stingri determinēti un neeksistē iespējas veikt tīkla optimizāciju, tā rezultātā tīklā parādās nevienlīdzīgs enerģijas patēriņš mezglos, un tīkls nav darbaspējīgs tajā brīdī, kad dažos tīkla mezglos beidzas elektrība, lai arī lielākā tīkla daļa turpina darboties.
- Pētījumi, kas saistīti ar bezvadu sensoru tīkla tehnisko īpašību uzlabošanu tīkla dzīves ilguma palielināšanai. Bezvadu sensoru tīkla galvenais trūkums ir mazjaudīgais akumulators, kas būtiski ierobežo tīkla dzīves ilgumu. Pašlaik eksistē

virikne metožu, kas ļauj atrisināt šo problēmu [THA 2008, RAG 2002, ZHO 2005]. Šeit var minēt individuālo akumulatora tilpuma izvēli, mezgla izvietojuma blīvumu, raidītāja jaudas pielāgošanu, energoefektīvo datu pārraides protokola pielietošanu, tīkla mezglu pozicionēšanu un citas metodes, kas ir saistītas ar papildus tīkla ieviešanas izdevumiem.

Samērā nesen tika piedāvāta jauna metode enerģijas balansēšanai, izmantojot tīkla koordinatora mezgla mobilitāti [VLA 2009], kas paredz dinamisko tīkla pārkonfigurācijas iespēju jeb tīkla topoloģijas maiņu. Par būtisku trūkumu šīs metodes pētījumā ir uzskatīta bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeļa neesamība.

Viens no būtiskiem bezvadu sensoru tīkla pētījuma rezultātiem, kas ir saistīts ar bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma palielināšanas metožu modelēšanu, ir Berkli universitātes piedāvātā reālā laika modelēšanas platforma, ko realizē MEMSIC [FIR 2015] uzņēmums. Modelēšanas procesā ir izmantotas platformas TelosB, MicaZ, Imote2. Visi apskatāmie risinājumi atbalsta TinyOs operētājsistēmu, kas plaši ir izmantota sensoru tīklos. Apskatot piedāvāto platformu, tika secināts, ka tā ļauj apskatīt rezultātu ar lielāku produktivitāti, bet tajā slikti ir apskatāmas energoefektivitātes īpašības. Visi trīs risinājumi izmanto promocijas darbā apskatāmo standartu IEEE 802.15.4, turklāt TelosB un MicaZ platformās ir izmantoti tehniskie risinājumi, kas ir izstrādāti Berkli universitātē un nav sertificēti izmantošanai EU. TelosB izstrādājumiem ir integrēti temperatūras, gaismas un mitruma sensori, MicaZ izstrādājumos ir paredzēta iespēja pieslēgt jebkura ražotāja esošo ārējo sensoru.

Pašlaik Rīgas Tehniskajā universitātē aktīvi tiek pētīti jautājumi, kas ir saistīti ar BST datu pārraides protokolu optimizāciju un atsevišķo tīkla elementu mijiedarbību tīklā. Zinātniskajos darbos apskatīti jautājumi, kas ir saistīti ar bezvadu sensoru tīkla komponentu mijiedarbību [JON 1999] un maršrutēšanas protokolu optimizāciju [MIE 2012], kas ļauj nodrošināt bezvadu sensoru tīkla mezgla grupēšanu, pārraides protokola optimizāciju un pielāgošanu konkrētajai videi un nodrošināt enerģijas patēriņa samazināšanu tīklā.

Promocijas darba mērķis

Izstrādāt un izpētīt bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeli un metodes, kas ļaus palielināt kopējo bezvadu sensoru tīkla dzīves ilgumu un līdzsvarot atlikušo enerģiju tīkla mezglos.

Promocijas darba uzdevumi

Promocijas darbā ir izvirzīti šādi uzdevumi:

- Izanalizēt esošās bezvadu tīkla dzīves ilguma palielināšanas metodes.
- Noteikt tīkla mezglu faktorus, kas ietekmē kopējo sistēmas dzīves ilgumu.
- Izstrādāt sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeli.
- Izstrādāt bezvadu sensoru tīkla darbības vadības metodes, kas ļaus līdzsvarot atlikušo enerģiju tīkla mezglos un palielināt kopējo BST dzīves ilgumu.
- Veikt izstrādātā modeļa eksperimentālo aprobāciju reālās bezvadu sensoru tīklu sistēmās.
- Veikt izstrādāto metožu validāciju, izmantojot imitācijas modelēšanas rīku.

Pētījuma priekšmets un objekts

Promocijas darba pētījuma priekšmets ir bezvadu sensoru tīkls bez alternatīvas enerģijas izmantošanas iespējām. Promocijas darba pētījuma objekts ir bezvadu tīkla mezgla elementu arhitektūra un komunikācijas algoritmi. Papildus pētījuma objektam ir detalizēti apskatītas tehniskās īpašības, kas saistītas ar pārraides signāla kvalitāti, tīkla konfigurācijas parametriem un patērētās enerģijas esošajām optimizācijas metodēm.

Darba hipotēzes

Izstrādājot jauno bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeli un BST pārkonfigurēšanas metodes, tika izvirzītas šādas hipotēzes:

- Dinamiska koordinatora izmantošana līdzsvaro atlikušo enerģiju mezglos un palielina kopējo bezvadu sensoru tīkla dzīves ilgumu.
- Atlikušās enerģijas balansēšanas metodes jāpielieto kopā ar maršrutēšanas algoritmiem, kas ļauj dinamiski pielāgot katra tīkla mezgla raidītāja darbības jaudu.
- Tīkla pārkonfigurēšanas metodes ir lietderīgi pielietot tīklos ar lielu mezglu skaitu, kur mezglu gulēšanas laiks $t_{idle} \rightarrow \min$.

Darba zinātniskais jaunieguvums

Izstrādātajam darbam ir šādi zinātniskie jaunieguvumi:

- Ir izstrādāts bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modelis, kas ļauj noteikt tīkla atteikuma laiku, ieskaitot tīkla atjaunošanas spējas.
- Ir izstrādāta dinamisko koordinatora mezgla vadības metode, kas ļauj līdzsvarot enerģijas patēriņu tīklā.
- Ir izstrādāta bezvadu sensora moduļa datu plūsmas vadības metode, kas, izmantojot maršrutēšanas algoritmu, veido tīkla topoloģiju, līdzsvarojot patērēto enerģiju tīklā.
- Ir piedāvāta virtuālā koordinatora mezgla vadības metode tīkla topoloģijas maiņai, kas izmanto heuristisko MREML algoritmu tīkla dzīves ilguma palielināšanai.

Darba praktiskā nozīmība

Pārkonfigurējama bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas metožu un modeļu eksperimentāla aprobācija veido darba praktisko vērtību. Promocijas darbam ir šāda praktiska nozīmība:

- Izstrādāts eksperimentālais bezvadu sensoru tīkla sensora mezgla prototips, kas, dinamiski veicot pārkonfigurāciju, var darboties termināla un maršrutētāja režīmā.
- Tika veikti eksperimenti, ieviešot izstrādātās bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metodes divos starptautiskajos projektos, kā arī piesaistīts KPFI līdzfinansējums prototipa aprobācijai privātajā sektorā.
- Tika izstrādāts eksperimentālais programmatūras prototips bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu imitācijas modelēšanai. Pamatojoties uz imitācijas modelēšanas laikā iegūtajiem rezultātiem, tika izdalīti BST pārkonfigurēšanas metožu pielietojuma ierobežojumi un nosacījumi.

Promocijas darba praktiskos rezultātus var izmantot automatizēto bezvadu sensoru vadības sistēmu izstrādes uzņēmumi, kas vēlas palielināt piedāvāto risinājuma autonomo darbības dzīves ilgumu, nepalielinot produkta kopējās izmaksas.

Promocijas darba ietvaros izstrādāto bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modelis un pārkonfigurēšanas metodes tika praktiski aprobētas:

- Klimata pārmaiņu finanšu instrumenta projektā “Atjaunojamo energoresursu izmantošana mājāsaimniecību sektorā” bezvadu sensoru tīkla ar vienu koordinatoru pārkonfigurēšanas metodes ieviešanai (sadarbībā ar SIA “MODERATOR”).
- Sensora mezgla ar integrēto dinamisko konfigurāciju realizācija Latvijas tirgū (sadarbībā ar SIA Chelsea Trade).
- ES 6. Ietvara programmas projektā UNITE (Unified Teaching Environment for the School): bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeļa aprobācija izglītojamo noslodzes sensoru autonomas dzīves ilguma novērtēšanai.
- Projektā eLogmar-M: bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeļa aprobācija, nosakot krāvas identifikācijas sensoru autonomo darbības laiku.

- SIA “Saulkrastu komunālserviss”: bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeļa pielietošana autonomā sensoru dzīves ilguma novērtēšanai.

Darbu rezultātu aprobācija

Par promocijas darba rezultātiem tika ziņots starptautiskās konferencēs:

1. IST4Balt Training Day, 2005. gada 9. decembris, Tallin, Estonia.
2. IST4Balt International Workshop, Rīga, 2005. gada 6.–7. aprīlis.
3. International Conference IVETA (Innovative Vocational Education and Training in the Transport Area), Rīga, 2005. gada 24.–25. februāris.
4. International eLogmar-M Conference “Web Based and Mobile Solutions with Logistics and Maritime Applications”, Rīga, 2006. gada 26. septembris.
5. International Conference “Distance Learning in Applied Informatics” Nitra, Slovakia, 2008, gada 13.–14. maijs.
6. 10th International Conference on Perspectives in Business Informatics Research BIR 2011. International Workshop INTEL-EDU Rīga, 2011. gada 6.–8. oktobris.
7. Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku 3. kongress un Letonikas 4. kongress “Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte.” Sekcija “Datorzinātne un informācijas tehnoloģijas”, Rīga, 2011. gada 24.–27. oktobris.
8. International BONITA project workshops, (Finland, 2012. gada 12. martā).
9. International BONITA project workshops, (Rīga, 2012. gada 12. martā).
10. 7.IP Starptautiskā projekta eINTERASIA partneru seminārs, Brēmene, Vācija, 2013. g. 24.-25. jūnijs.
11. 56th International Scientific Conference of Riga Technical University, Rīga, 2014. gada 14.–17. oktobris.
12. 7.IP Starptautiskā projekta eINTERASIA partneru seminārs, Viļņa, Lietuva, 2015. g. 12.-13. marts.
13. 10th International Scientific Practical Conference “Environment. Technology. Resources”, Rēzekne, Latvia, 2015. gada 18.–20. jūnijs.
14. 29th European Simulation and Modelling Conference (ESM 2015), Leicester, Lielbritānija, 2015. gada 26.–28. oktobris.
15. 13th International Conference on DATA NETWORKS, COMMUNICATIONS, COMPUTERS (DNCOCO '15), Budapešta, Ungārija, 2015. gada, 12.-14. decembris.
16. IEEE 3rd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering, Rīga, Latvija, 2015. gada 13.-14. novembris.

Promocijas darba sasniegtie rezultāti ir atspoguļoti sekojošās publikācijās:

1. A.Jurenoks, Mobile Positioning. In Proceeding: EC Project IST4Balt News Journal vol.2. (Proceedings of the IST4Balt Workshop) 2005, pp. 57 – 60. ISSN: 1816-8701.
2. T.Rikure, A.Jurenoks, E.Latiševa. Wireless network technologies: security and e-learning applications. In: Scientific Proceedings of Riga Technical University, Computer Science Applied Computer System, Vol 5, Rīga 2005, ISSN: 1407-7493, pp.140-148. **CITED IN:** EBSCO, VINITI.
3. A.Jurenoks. Mobile Solutions in Transport Logistics. In: Proceedings of IST4Balt International workshop “IST 6th Framework Programme – Great opportunity for cooperation & collaboration”, 6-7 April, 2005, Riga, Latvia, pp. 88 - 90, ISBN 9984-32-178-9.
4. T. Rikure, A. Jurenoks. Wireless Network Technologies in Transport Area: Security and eLearning Applications. In: Proceedings of the International Conference IVETTA (Innovative Vocational Education and Training in the

- Transport Area) 2005, 24-25 February, 2005, Riga, Latvia, ISBN: 9984-9820-0-9, pp. 249-255.
5. A. Jurenoks, Evolution of Wireless applications. In: Annual Proceedings of Vidzeme University College "ICTE in Regional Development", Valmiera, Latvija, 2006, pp. 124 - 126., ISBN: 9984-633-03-9.
 6. A.Jurenoks. Wireless communication technologies in multimedia systems. In: Scientific Proceedings of the Project eLOGMAR-M, 2006, ISBN: 9984-30-119-2, pp.151-155.
 7. A. Jurenoks, T. Rikure, L. Novickis, V. Šitikovs. e-Learning Environment Implementation in Riga 3rd Secondary School (UNITE Project). In: Proceeding of International Project's IST4BALT "IST4Balt News Journal", vol. 3, 2007, ISSN 1816-8701, pp. 29 – 30.
 8. A. Jurenoks, J. Lavendels, V. Šitikovs. Usage of e-Learning System UNITE in Informatics Course of Secondary School. (European Project's Case Study). In: Proceedings of International Conference "Distance Learning in Applied Informatics", Slovakia, Nitra, May 2008, ISBN 978-80-8094-317-2, pp. 209-215.
 9. L. Novickis, A. Mitasiunas, T. Rikure, A. Jurenoks. Promotion of e-Learning Solution via Information Technology Transfer Concept and Baltic Regional Competence Network. In: Proceeding of the International Conference "Virtual and Augmented Reality in Education" (VARE 2011), Vidzemes Augstskola, March 2011. pp. 71 - 80. **CITED IN: EBSCO.**
 10. A. Mitasiunas, T. Rikure, L. Novickis, A. Jurenoks. Further development of Information Technology Transfer Concept for Adaptation and Exploitation of European Research Results in the Baltic Sea Region Countries. In: Scientific Journal of Riga Technical University. Computer Science. Vol. 45, Issue 1, pp. 9-16. ISSN 1407-7493, February 2012. **CITED IN: IEEE, ACM, LNCS, DE Gruyter, EBSCO, VINITI.**
 11. A. Jurenoks, L. Novickis. Wireless Sensor Networks LifeTime Assessment Model Development. In: Proceedings of 10th International Scientific and Practical Conference "Environment. Technology. Resources", Rezekne, Latvia, 2015. June, ISSN 1691-5402, pp. 121 – 126. **Will be indexed: SCOPUS.**
 12. A. Jurenoks, L. Novickis. Wireless Sensor Network Live Circle Simulation Tools to Balance Energy Consumption in the Network Nodes. In: Proceedings of 29th European Simulation and Modelling Conference (ESM 2015), Leicester, Lielbritānija, 2015. gada 26.–28. oktobris. ISBN: 978-9077381-908, pp. 245 – 249. **CITED IN: IEEE Xplore. Will be indexed: SCOPUS.**
 13. A. Jurenoks, L. Novickis. Modification of routing protocols of the wireless sensor network for increasing the network life expectancy. In: Proceedings of 13th International Conference on DATA NETWORKS, COMMUNICATIONS, COMPUTERS (DNCOCO '15), Budapest, Hungary, 2015. gada, 12-14. novembrī, pp. 110-118, ISBN: 978-1-61804-355-9. WSEAS Press. **Will be indexed: SCOPUS.**
 14. A. Jurenoks. Method for node lifetime assessment in wireless sensor network with dynamic coordinator. In: Proceedings of Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2015 IEEE 3rd Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering. 13 – 14. nov. 2015, Riga, Latvia, **CITED IN: DOI: 10.1109/AIEEE.2015.7367302.**
 15. A. Jurenoks, L. Novickis. Method for Balancing Energy through the Mobility of Node Agent in Mobile Sensor Network. Scientific Journal of Riga Technical University, Information Technology and Management Science, 2015, Vol.18,

RTU, Rīga, pp. 17-23. **CITED IN: EBSCO, Google Scholar, Ulrich's International Periodicals Directory, VINITI.**

16. A. Jurenoks, M. Boronowsky. Dynamic Coordinator Mobility Management Methodology for Balancing Energy Consumption in the Wireless Sensor Network. In: *Procedia Computer Science Volume 77, ICTE in regional Development 2015 Valmiera, Latvia*, pp. 176–183, **CITED IN: DOI: 10.1016/j.procs.2015.12.380. Will be indexed: SCOPUS.**

Darba struktūra

Promocijas darbs satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 59 attēlus un 10 tabulas. Promocijas darba pamata teksts ir uzrakstīts uz 156 lappusēm. Literatūras sarakstā ir 130 avoti. Promocijas darba struktūra ir šāda:

Ievadā ir pamatots pētījuma aktualitātes nozīmīgums, apskatīta objekta pielietojuma vide, formulēti galvenie promocijas darba mērķi un uzdevumi, aprakstīta pētījumu zinātniskā novitāte un sasniegto rezultātu praktiskais jaunieguvums, kā arī izklāstīts darba rezultātu aprobācijas process.

Pirmajā nodaļā “Bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas problēmas, esošās situācijas analīze. Sistēmas arhitektūra” ir apskatīti vispārējie bezvadu tīkla konfigurācijas veidi un īpašības, kas tiks izmantotas tīkla modeļa veidošanas gaitā. Ir apskatīti esošie bezvadu sensoru tīkla standarti un pielietojuma veidi. Izdalīti faktori, kas ietekmē bezvadu tīkla darbības veidu un informācijas pārraides kvalitāti.

Nodaļā tiek dots vispārīgais bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma apskats ar autonomo barošanas avotu bez enerģijas atjaunošanas iespējām un ir analizēti iespējamie tīkla dzīves ilguma palielināšanas veidi.

Detalizēti ir apskatīta tīkla mezglu enerģijas balansēšanas metožu grupa, kurā ir izdalīta tīkla dinamiskās rekonfigurācijas perspektīvā metode.

Otrajā nodaļā “Bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeļa izstrāde” ir apskatīts izstrādātais sensoru tīkla modelis, kas ļauj novērtēt tīkla dzīves ilgumu, izmantojot apskatāmu tīkla uzbūves topoloģiju un mezglu tehniskās īpašības. Detalizēti aprakstīta galvenā modeļa parametru aprēķina metode. Ir novērtēts atsevišķo tīkla mezglu dzīves ilgums, izmantojot bezvadu sensoru tīkla mezglu tehniskās vērtības.

Nodaļā ir apskatīti tīkla mezglu sadalījuma nosacījumi un izdalīti pamata koeficienti, kas ietekmē kopējo bezvadu sensoru tīkla dzīves ilgumu.

Ir izanalizētas bezvadu sensoru tīkla galveno mezglu dzīves cikla aprēķina metodes un piedāvāts bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modelis, ņemot vērā tīkla elementa darbības rādiusu un pārsūtāmās informācijas noslodzi. Praktiski ir apskatīts atsevišķo mezglu patērētās enerģijas aprēķinu piemērs, izmantojot piedāvāto dzīves ilguma novērtēšanas modeli.

Trešajā nodaļā “Bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metodes izstrāde” ir aprakstītas trīs promocijas darbā izstrādātās tīkla pārkonfigurēšanas metodes dzīves ilguma palielināšanai, kas ļauj risināt datu plūsmas plānošanas uzdevumu, ievērojot mezgla enerģijas balansēšanu tīklā.

Autonoma dinamiskā tīkla patērētās enerģijas balansēšanai nodaļā ir piedāvāts izmantot dinamisko koordinatora mezgla vadības metodi.

Gadījumos, kad tīkla parametri ar laiku ir mainīti un nav iespējams prognozēt koordinatora kustību tīklā, ir piedāvāts izmantot virtuālo koordinatora mezgla vadības metodi, aktivizējot autonomo tīkla mezgla vadības moduli. Virtuālā koordinatora vadības metodē ir izmantots promocijas darbā piedāvātais heuristiskais algoritms MREML, kas salīdzinājumā ar esošiem algoritmiem būtiski palielina kopējo BST dzīves ilgumu.

Tīkla stāvokļa monitoringam un topoloģijas maiņai ir ieviests mezgla darbības vadības modulis. Mezgla darbības moduļa lokalizācijas mehānisms ir sadalīts četrās fāzēs: uzraudzības, sadalījuma, komunikāciju un darbības fāze.

Tiek izstrādāta bezvadu sensora moduļa datu plūsmas vadības metode, kas, izmantojot promocijas darbā aprakstīto algoritmu, veido tīkla darbības topoloģiju, līdzsvarojot patērēto enerģiju tīklā. Promocijas darbā piedāvātā algoritma divas būtiskas priekšrocības ir - iespēja to integrēt terminālā mezglā, kam ir ierobežoti tehniskie resursi un enerģija, un par ceļa veidošanas primāro parametru ir uzskatīts vidējais atlikušās enerģijas skaits tīklā.

Ceturtajā nodaļā “Uz modelēšanu balstīta bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeļa un metožu eksperimentāla validācija” ir veltīta izstrādāto modeļu un metožu eksperimentālai aprobācijai. Apskatīti trīs fiziskie eksperimenti un ar to saistītie uzdevumi.

Pamatojoties uz to, ka promocijas darba laikā nebija iespējams veikt plašu fizisko eksperimentu, piesaistot lielu mezglu skaitu un veicot pētījumu ilgākā laika periodā, nodaļā ir piedāvāts izmantot imitācijas modelēšanu piedāvāto metožu, algoritmu un modeļu aprobācijai.

Nodaļā ir aprakstīti esošie imitācijas modelēšanas rīki, kas atbalsta bezvadu sensoru tīkla modelēšanas iespējas, veikts rīku tehnisko īpašību salīdzinājums, kā rezultātā piedāvāts promocijas darba laikā izstrādātais imitācijas modelēšanas rīks bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma modelēšanas procesam.

Izmantojot imitācijas modelēšanu, ir veikts:

- piedāvāto metožu un modeļu efektivitātes salīdzinājums attiecībā pret esošajām metodēm;
- izpētīta dzīves ilguma palielināšanas iespēja, kas atkarīga no BST mezglu darbības parametriem.

Izmantojot eksperimentu laikā iegūto informāciju, nodaļas noslēgumā piedāvāti nosacījumi promocijas darbā piedāvāto metožu, algoritmu un modeļu efektīvai izmantošanai.

1. BEZVADU SENSORU TĪKLA DZĪVES ILGUMA PALIELINĀŠANAS PROBLĒMAS, ESOŠĀS SITUĀCIJAS ANALĪZE. SISTĒMAS ARHITEKTŪRA

Nodaļā veiktā pieejamo resursu analīze parādīja, ka bezvadu sensoru tīkli ir perspektīvā tehnoloģija, ko plaši izmanto informācijas savākšanai no ārējās vides un autonomas vadības nodrošināšanai dažādās jomās.

Bezvadu sensoru tīklu pētījumu apskats

Izmantojot zinātniskajos darbos sniegto informāciju [BI 2007, VLA 2009], var apgalvot, ka pēdējā laikā bezvadu sensoru tīkla pētījumu sfērā ir izdalīti aktuālie pētījuma virzieni:

- Informācijas plūsmas organizācija tīklā, kas ir saistīta ar bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma palielināšanu.
- Barošanas avotu pielāgošana alternatīvas enerģijas izmantošanai bezvadu sensoru tīklos. [WAN 2005, [NXP 2015].
- Pētījumi, kas saistīti ar bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma palielināšanu, izmantojot nemodificētus bezvadu sensoru tīklus. [THA 2008, RAG 2002].

Pašlaik Latvijā ir universitātes, kurās aktīvi ir apskatītas bezvadu sensoru tīkla darbības uzlabošanas problēmas ar nolūku palielināt kopējo bezvadu sensoru tīkla dzīves ilgumu, saglabājot informācijas savākšanas kvalitāti:

- Rīgas Tehniskajā universitātē tiek pētīti jautājumi, kas ir saistīti ar BST datu pārraides protokolu optimizāciju un atsevišķo tīkla elementu mijiedarbību tīklā. Zinātniskajos darbos apskatīti jautājumi, kas ir saistīti ar bezvadu sensoru tīkla komponentu mijiedarbību [JON 1999] un maršrutēšanas protokolu optimizāciju [MIE 2012], kas ļauj nodrošināt bezvadu sensoru tīkla mezgla grupēšanu, pārraides protokola optimizāciju un pielāgošanu konkrētajai videi un nodrošināt enerģijas patēriņa samazināšanu tīklā.
- Liepājas Universitātes Matemātikas un informācijas tehnoloģiju institūtā profesora Sharif E. Guseynov vadībā tiek apskatīti jautājumi, kas ir saistīti ar bezvadu sensoru tīkla saņemto rezultātu matemātisko modelēšanu ar nolūku samazināt pārraidītās informācijas skaitu tīklā [GUS 2015].

Bezvadu sensoru tīkla jēdziens

Sensoru tīkls ir izplatīts bezvadu tīkls ar tīkla mezglu pārkonfigurācijas iespējām, kas sastāv no mazgabarīta intelektuālām sensoru ierīcēm [KRI 2005, BIII 2005]. Katra ierīce ir aprīkota ar centrālu mazjaudīgu skaitļošanas procesoru, radio retranslatoru, barošanas avotu un ar nepieciešamajiem sensoriem ārējās vides mērījumu veikšanai (piemēram, temperatūra, gaismas spilgtums, vibrācija, spiediens, skaņas līmenis un citi).

Sensoru tīkli tehnoloģiski ietilpst “uz situāciju bāzēto” tīklu kategorijā (no angļu valodas - ad hoc) [IBA 2008], kas sastāv no sadalītiem vienlīdzīgiem mezgliem, kur katrs mezgls var veikt datu apmaiņu (sarunāties) ar citiem, blakus esošiem mezgliem. Sensoru tīkla lielākā tehniskā īpašība ir, ka tīkla elementus var precīzi sadalīt pēc darbības uzdevumiem, izmantojot mezgla pildāmo uzdevumu kritērijus.

Bezvadu sensoru tīkls mūsdienās ir viens no perspektīvākajiem sakaru tīklu attīstības virzieniem. BST sastāv no daudziem atsevišķi stāvošiem mezgliem, kas ļauj:

- nolasīt apkārtējās vides stāvokli, piemēram, temperatūru, mitrumu, atmosfēras sastāvu;
- nolasīt objektu īpašības, piemēram, ātrums, izmērs;
- uzglabāt un analizēt no sensoru devējiem saņemto informāciju;
- pārraidīt informāciju, izmantojot mūsdienas sakaru kanālus un pārraides veidus.

Bezvadu sensoru tīklam ir trīs svarīgākās atšķirības no tradicionālajiem datoru tīkliem:

- tīkls sastāv no liela objektu skaita, kas darbības laikā var būt dinamiski papildināts;
- tīkla mezgli izmanto dinamiskās konfigurācijas;
- ierobežotas atsevišķo mezglu tehniskās iespējas;
- tīkls izmanto dinamisko tīkla topoloģiju;
- zems enerģijas patēriņš mezglos.

Nodaļā aprakstītā bezvadu sensoru tīkla tehniskā IEEE 802.11.x specifikācija norāda uz faktoriem, kas nosaka pārraidītās informācijas kvalitāti un ātrumu. Ir izdalīti raidītāja stāvokļi, kas nosaka kopējo mezgla dzīves ilgumu.

Nodaļā ir apskatīti mūsdienās izmantotie bezvadu sensoru tīkla datu plūsmas modeļi un to īpašības. Detalizēti apskatītas ON-OFF tīkla darbības modeļa izmantošanas īpašības, un OFF intervāla ietekme uz tīkla kopējo dzīves ilgumu. Rezultātā ir pierādīts:

- tīkla darbības ciklā eksistē minimālais laika intervāls T_{min}^{ON} , kurā mezgla jāatrodas darba režīmā visu iterāciju izpildei,
- ja tīkla mezgls atrodas gulēšanas režīmā ar ieslēgtu retranslatora mezglu, sistēma turpina patērēt enerģiju, pārsūtot tehniska rakstura informāciju.

Sensoru tīkla dzīves cikla jēdziens

Primārais BST rādītājs, kas nosaka tīkla pielietojumu praksē, ir tīkla kopējais dzīves ilgums un uzdevumi, kas ir saistīti ar dzīves ilguma modelēšanu un praktisko pielietojumu. Pārkonfigurējama tīkla izmantošana ir viena no perspektīvākajām dzīves ilguma palielināšanas metodēm, kas ļauj samazināt neizmantotās enerģijas pārpalikumu mezglos.

Sensoru tīkla koncepcija paredz, ka jebkurš tīkla mezgls izmanto autonomu barošanas avotu. Jebkurš tīkla elements pilda noteiktu uzdevumu kopējā tīklā, kas pēc tīkla scenārija ir iepriekš ieprogrammēts. Ja elements pārstāj darboties, tas nosaka:

- uzdevuma kopums, ko pilda tīkla elements, nav kritisks, tas var nozīmēt, ka ir samazināta tīkla apkalpošanas (datu savākšanas) kvalitāte (QoS). [CHE 2006]
- mezgls pilda svarīgu jeb nesošo sistēmas daļu – tā atteikums un neiespējamība aizvietot to ar citiem tīkla dinamiskiem elementiem var nozīmēt visa sensoru tīkla atteikumu.

Pamatojoties uz to, ka visi sensoru tīkla elementi ir autonomi, obligāti pienāk laiks, kad tīkls vairs nevar pildīt savu uzdevumu un pārstāj eksistēt. Laiks starp tīkla palaišanu un apstāšanos ir definēts kā sensoru tīkla dzīves cikls [ЖДА 2009].

Apskatot sensoru tīkla dzīves ciklu, ir svarīgi pievērst uzmanību tīkla energoefektivitātei. Tīkla energoefektivitāte ir atkarīga no pielietotā standartu raksturojuma, izmantotā algoritma un tīkla protokola. Izstrādājot tīkla topoloģiju, energoefektivitātes palielināšana ir viens no svarīgākajiem uzdevumu faktoriem, no kā ir atkarīgs tīkla darbības dzīves cikls.

Šodien neeksistē universālas energoefektivitātes definīcijas – tā ir atkarīga no konkrētas pielietojuma sfēras. Dažreiz par energoefektivitāti ir uzskatītas sensoru tīkla energoresursu atjaunošanas spējas un iespējas. Piemēram, [EФP 2007] ir definēts energoefektivitātes koeficients :

$$\Xi = \frac{W_l}{W_l + W_{nl}}, \quad (1.1)$$

kur W_l - lietderīgi izmantota enerģija, W_{nl} – nelietderīgi vai uz neparedzētiem notikumiem izmantota enerģija.

Bieži darbos, kas ir saistīti ar BST, termins tīkla energoefektivitāte ir pielīdzināts tīkla autonoma darbības ciklam un uzskatīts, ka lielāks autonomais tīkla darbības laiks nodrošina lielāku tīkla energoefektivitāti. Šo faktu var noraidīt, piemēram, tīklam, kurā neeksistē lietderīgo datu pārraide, bet enerģija ir izmantota tikai parazītu procesiem (W_{nl}), ir lielāks autonomas darbības laiks nekā tīklam, kas pārraida lietderīgu informāciju. Izmantojot energoefektivitātes formulu, ja lietderīgās enerģijas parametrs $W_l = 0$, efektivitātes koeficients būs vienāds ar 0.

Enerģijas balansēšanas metožu grupas izmantošanas iespējas

Mūsdienīgas tehnoloģijas ļauj radīt procesoru ar ļoti mazu elektroenerģijas patēriņu, tieši tāpēc procesora darbība nenozīmīgi ietekmē sistēmas dzīves ciklu. Galvenokārt elektroenerģija ir patērēta pārraidot datus, izmantojot gan fizisko, gan bezvadu tīklu.

Lai izlīdzinātu visu tīkla mezglu patērēto enerģiju, ir izmantotas dažādas enerģijas balansēšanas metodes (energy balancing).

Heterogēna tīkla uzbūve paredz dažādu metožu izmantošanu energoefektivitātes uzlabošanai.

- Akumulatora tilpuma pielāgošana, pamatojoties uz elementa atrašanās vietu tīklā [HAL 2011].
- Diferencēts tīkla mezglu blīvums atkarībā no paredzētā pārraides blīvuma kādā konkrētā zonā [HAM 2009].

Programmatūras līmenī galvenokārt ir izmantoti maršrutēšanas protokoli, kas balstīti uz atlikušās enerģijas mērvienībām mezglos [CHE 2012], virtuālo koordināšu izmantošanu [BAC 2009], tālas un tuvas pārraides miju [ZHU 2008], mezglu pozicionēšanu [KYP 2011], kā arī kopas izmantošanu [SUN 2002].

Par perspektīvu balansēšanas metodi ir uzskatīta tīkla komponentu mobilitātes izmantošana. Dažādos darbos [VOS 2009, WU 2005] autori parādīja, ka mobilitātes izmantošana nes lielāku labumu sensoru tīkla autonomas darbības paaugstināšanai. Tieši tāpēc šī pieeja detalizēti tiks apskatīta turpmākajā promocijas darbā.

Bezvadu sensoru tīkla dzīves cikla modelēšanas laikā izmantotās metodes

Nodaļas noslēgumā ir apskatītas bezvadu sensoru tīkla dzīves cikla modelēšanas laikā izmantotās metodes. Ir dots apskatīto modelēšanas metožu salīdzinājums un secināts, ka BST dzīves cikla modelēšanas gadījumā ir jāizmanto hibrīda modelēšanas variants, kas ietver sevī vairākas metodes uzdevumu sasniegšanai.

Izmantojot literatūrā veikto modelēšanas procesā izmantoto metožu pielietojuma salīdzinājumu [GUS 2015, MUN 2009], 1.1.tabulā ir attēlots modelēšanas procesā izmantoto metožu pielietojuma salīdzinājums, veicot bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma modelēšanu.

1.1.tabula

Modelēšanas procesā izmantoto metožu pielietojuma salīdzinājums

Metode / Modelis	Precizitāte	Nepieciešamo resursu skaits	Adaptācijas iespējas
Varbūtības teorija	neatbalsta	atbalsta	neatbalsta
Masu apkalpošanas teorija	neatbalsta	neatbalsta	atbalsta
Petri tīkli	neatbalsta	neatbalsta	neatbalsta
Grafu teorija	atbalsta	neatbalsta	atbalsta
Automātu teorija	atbalsta	neatbalsta	neatbalsta

Tas liek secināt, ka neviena no esošajām tīkla modelēšanas laikā izmantotām metodēm neatbilst tīkla dzīves ilguma modelēšanai. Ir nepieciešams izmantot hibrīda variantu, kas ietver sevī vairākas metodes uzdevumu sasniegšanai.

2. BEZVADU SENSORU TĪKLA DZĪVES ILGUMA NOVĒRTĒŠANAS MODEĻA IZSTRĀDE

BST dzīves ilguma novērtēšanas modeļa metožu un modeļu mijiedarbība

Bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanai promocijas darbā ir izstrādāts modelis, kas ļauj noteikt maksimālo iterācijas skaitu tīklā, izmantojot atsevišķo mezglu dzīves ilguma novērtējumu, tīkla struktūru darbības laikā, un pārraidīto informācijas kvalitāti ietekmējošo faktoru izmantošanu.

Modeļa izmantošanas metode sastāv no šādiem posmiem:

1. Izmantojot promocijas darba pirmajā nodaļā aprakstīto bezvadu sensoru tīkla 802.11.4 protokola tehniskās īpašības, ir izdalīti mezgla darbības režīmi, kas ietekmē kopējo mezgla darbības ilgumu.
2. Mezglam darbojoties, rūpnieciski definēti tehniskie parametri un faktori, ko nosaka izmantotā protokola specifikācija, vide un fiziskās īpašības. Pamatojoties uz citos autoru darbos aprakstīto bezvadu sensoru tīkla ietekmējošo ārējo faktoru klasifikāciju [IEE 2015, LAJ 2009, OPE 2015], promocijas darbā ir apskatīti četri tehniskie faktori, kas nosaka izmantoto jaudu katrā mezglā:
 - IEEE 802.15.4 kanālu pieejamības koeficienta noteikšana.
 - IEEE 802.15.4 standarta īpašību koeficienta noteikšana.
 - Tehniskās informācijas pārsūtīšanas laika koeficienta noteikšana.

- Darbības diapazona noteikšana.
3. Nosakot mezgla darbības režīmā patērēto enerģiju, ir noteikts mezgla darbības stāvoklis noteiktajā tīkla iterācijas reizē. Gadījumā, ja patērēta enerģija, mezglam atrodoties sūtīšanas režīmā, līdzinās nullei, ir uzskatīts, ka mezgls pilda termināla lomu, citos gadījumos mezgls pilda maršrutēšanas lomu.
 4. Katram mezgla stāvoklim promocijas darbā ir piedāvāta metode patērētās enerģijas noteikšanai katrā tīkla iterācijas reizē.
 5. Izmantojot citu autoru darbos aprakstītās tīkla dzīves ilguma noteikšanas metodes [CHE 2004, COL 2007, YE 2004, COL 2007], ir izdalīti rādītāji, kas nosaka bezvadu sensoru tīkla aktivitātes stāvokli:
 - uz strādājošo mezglu balstīts rādītājs,
 - uz zonas pārklājumu balstīts rādītājs,
 - uz informācijas pārraides kavēšanu balstīts rādītājs,
 - tīkla topoloģijas maiņas laika rādītājs.
 6. Nodaļas noslēgumā ir piedāvāts bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modelis, kas ļauj noteikt maksimālo iterācijas skaitu tīklam, kas izmanto nemainīgo topoloģiju.

Sensoru tīkla mezglu enerģijas patēriņu ietekmējošie faktori

Ir saprotams, ka bezvadu sensoru tīkla mezglu var uzskatīt par strādājošu tik ilgi, cik tas ir spējīgs korekti nolasīt informāciju no sensoriem un pārsūtīt to koordinatora mezglam tīklā. Izstrādājot tīklu, ir nepieciešams savlaicīgi novērtēt katra tīkla elementa aptuveno darbības laiku, līdz brīdim, kad būs nepieciešama elementa akumulatora maiņa.

Kopējais tīkla enerģijas patēriņš atkarīgs no vairākiem faktoriem:

- Mezgla izdalītie tehniskie parametri (baterijas tilpums, patērēta procesora, raidītāja, sensoru un citu elementu jauda).
- Datu savākšanas frekvence, kas var būt atkarīga no situācijas un vides, kurā darbojas tīkls.
- Fizisko un kanāla līmeņa protokoli, kas nosaka pieejas mehānismu kontroli videi. [LAJ 2009, PU 2010, ZHA 2009, LUO 2014].
- Tīkla topoloģija, kas nosaka katrā mezglā pārsūtītās informācijas plūsmas lielumu (ieskaitot tehniskās informācijas plūsmu).
- Maršrutēšanas protokola izmantošana, kas papildina tīklu ar papildu dienesta datu plūsmu. [POL 2004, SHA 2003].

Jebkurā sensoru tīklā ir trīs mezgla veidi – termināli, maršrutētāji un koordinators vai datu savācējs. Datu savācēji neietekmē kopējo sistēmas dzīves ilgumu, jo tie ir nodrošināti ar pastāvīgu barošanas avotu vai ir aprīkoti ar krietni jaudīgāku autonomo barošanas bloku.

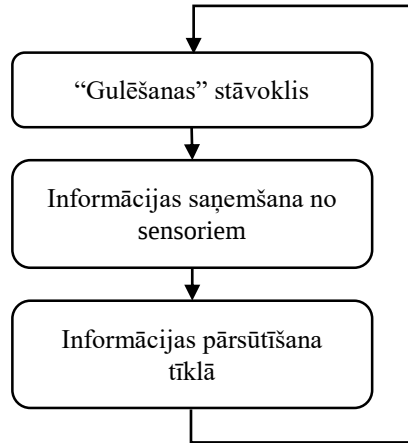
Apskatīsim terminālu un maršrutētāju dzīves cikla aprēķina metodi. Tā ir balstīta uz dažiem pieņēmumiem:

- Tīkla mezglu darbības algoritms ir stingri determinēts. Gadījumā, ja sistēmu ietekmē ārējie faktori, tad ir zināms metožu izmaiņu matemātiskais pamatojums.
- Neeksistē baterijas atjaunošanas iespējas. Ja pastāv tāda iespēja, tad to var izmantot, palielinot sākotnējo enerģijas lielumu [SCH 2003]. Rezultātā, zinot sākotnējo baterijas enerģiju E_0 un mezgla kopējo izmantoto jaudu ΔP , ir iegūts sistēmas dzīves ilgums $t = \frac{E_0}{\Delta P}$.

Termināla dzīves ilguma novērtēšana

Sensoru tīkla termināla mezgls ir paredzēts informācijas nolasīšanai no sensoriem turpmākai datu nosūtīšanai tīklā. Šī mezgla atšķirība no maršrutētāja ir informācijas pārraidē neiespējamība.

Izmantojot uz notikumu bāzētu vai uz sarakstu bāzētu modeli, mezgls darbojas, izmantojot ciklisko shēmu (2.1.att.).



2.1. att. Termināla mezgla darbības algoritms

Termināla mezgla katrā stāvoklī izmantotā jauda ir aprēķināta pēc formulas, izmantojot sensoru mezgla tehnisko informāciju un noteikto darbības frekvences tabulu:

$$P_{term} = P_{tx} * t_{tx} + P_s * t_s + P_a * t_a, \quad (2.1)$$

kur P_{tx} – vidējā patērētā jauda sūtīšanas režīmā [W];

t_{tx} – laiks, kas ir nepieciešams informācijas nosūtīšanai tīklā [s];

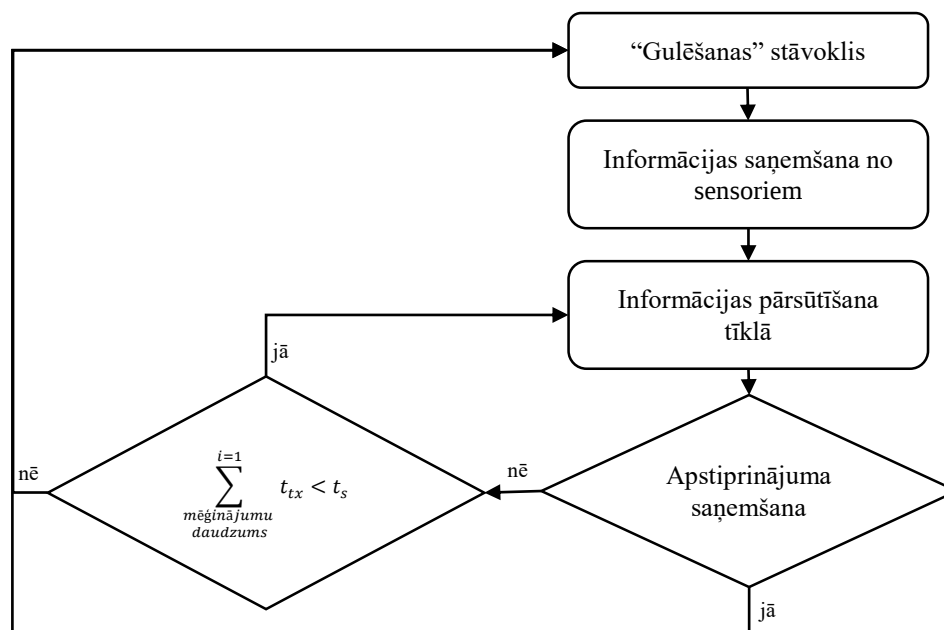
P_s – vidējā patērētā jauda gulēšanas režīmā [W];

t_s – laiks, kad sistēma atrodas gulēšanas režīmā [s];

P_a – datu apstrādei (informācijas nolasīšanai no sensoriem) patērētā jauda [W];

t_a – laiks, kas paredzēts informācijas apstrādei [s].

Ir pieņemts, ka $\Delta t_{tx} + t_a \leq t_s$. Tas nozīmē, ka sistēma var veltīt informācijas atkārtotai sūtīšanai ne vairāk kā t_s laika. Ja informācija nebūs nogādāta, tā tiks uzskatīta par pazaudētu, tāpēc mezgla darbību var attēlot, izmantojot modificēto algoritmu (2.2.att):



2.2. att. Termināla darbības algoritms ar kļūdas validāciju

Maršrutētāja dzīves ilguma novērtēšana

Ir zināms, ka uz notikumiem orientētiem sensoru tīkliem, kas izmanto asinhrono datu pieejas vidi, maršrutētājs ir vājākais punkts kopējā sistēmas dzīves cikla ilguma pastāvēšanā. Tas ir pamatots ar to, ka mezgls ļoti neilgu laiku vai vispār neatrodas gulēšanas režīmā, bet patērē enerģiju informācijas saņemšanai no tīkla un informācijas pārsūtīšanai tīklam. Maršrutētāja kopējā izmantotā jauda ir atkarīga no izvēlēta maršrutēšanas protokola, kas nosaka pārraidītas dienesta informācijas skaitu tīklā.

Turpmāk mēs apskatīsim maršrutētāja modeli, kas uzskaita tikai lietderīgo datu plūsmu, bet dienesta informācija netiek uzskaitīta. Paralēli pieņemsim, ka mūsu tīklā netiek izmantotas plašās pārraides metodes, tādas kā multiraide vai radiopārraide. Tas nosaka, ka maršrutētāja uzdevums ir pakešu retranslācija tādā pašā veidā, kā tā ir saņemta (kā jau tika minēts iepriekš, ir uzskatīts, ka maršrutēšanas tabulas maiņā dati vai dienesta informācija neietekmē pārraides lielumu un laiku).

Maršrutētājam ir četri darbības stāvokļi:

- t_s – laiks sistēmas gulēšanas režīmā,
- t_{rx} – laiks informācijas saņemšanai no tīkla,
- t_{tx} – laiks informācijas sūtīšanai tīklā,
- t_a – laiks informācijas nolasīšanai no sensoriem.

Tā kā tīkla darbība ir stingri determinēta, tad var uzskatīt, ka maršrutētāja $\Delta t_{rx} + \Delta t_{tx} \leq t_s$. Pārsūtot informāciju tīklā, ir pieļaujama kļūda, un būs nepieciešams ilgāks laiks datu nosūtīšanai un saņemšanai, tāpēc ir nepieciešams ieviest papildus parametru p_e – kļūdu varbūtība procentos. Izmantojot kļūdas varbūtības koeficientu tīklā, var uzskatīt, ka $p_e(\Delta t_{rx} + \Delta t_{tx}) \leq t_s$. BST kopējais cikla dzīves ilguma t_c un sistēmas gulēšanas laiks t_s ir atkarīgs no maršrutētāja apkalpoto terminālu skaita.

Laiks, ko sistēma iztērē visas informācijas saņemšanai, ir vienāds ar:

$$r_{rx}(T) = \sum_{i=1}^n t_i^T * I_i, \quad (2.2)$$

kur t_i – laiks, kas ir nepieciešams informācijas saņemšanai no viena termināla [s], T – laika intervāls, kurā darbojas sistēma, I_i – i – plūsmas datu intensitāte.

Laiks, ko sistēma iztērēs visas informācijas aizsūtīšanai tīklā, ir vienāds ar:

$$r_{tx}(T) = \sum_{i=1}^{n+1} t_i^T * I_i, \quad (2.3)$$

Eksistē situācijas, kad sistēma nav spējīga pārsūtīt visu nepieciešamo informāciju, ko mezgls ir saņēmis darbības laikā no citiem mezgliem $r_{rx} > r_{tx}$. Pirms informāciju saņemšanas sistēma pārbauda, vai būs pietiekams laiks informācijas pārsūtīšanai.

Plānojot maršrutētāja noslodzi, ir jāņem vērā kopējo maršrutētāja cikla darbības laiku Δr .

$$\Delta r < p_e(r_{rx} + r_{tx}) + r_a, \quad (2.4)$$

kur r_a - laiks, informācijas saņemšanai no sensoriem [s].

Apskatīsim situāciju, kad $r_{rx} + r_{tx} + r_a \leq r_s$, tas nozīmē, ka maršrutētājs ir spējīgs izpildīt savu uzdevumu un pārsūtīt informāciju tīklā. Šajā gadījumā maršrutētāja izmantotā jauda būs vienāda:

$$P_m = P_a * r_a + P_{tx} * r_{tx} + P_{rx} * r_{rx} + (r_s - r_{tx} - r_{rs}) * P_s, \quad (2.5)$$

kur P_{tx} - vidējā maršrutētāja jauda sūtīšanas režīmā, P_{rx} - vidējā maršrutētāja jauda saņemšanas režīmā, P_a - vidējā maršrutētāja jauda, saņemot informāciju no sensoriem, P_s - maršrutētāja jauda gulēšanas režīmā.

Tīkla mezglu izmantotās jaudas ietekmējošo faktoru novērtēšanas modeļa komponents

IEEE 802.15.4 kanālu pieejamības koeficienta noteikšana

IEEE 802.15.4 standarts izmanto plaši pielietotu CSMA/CA sadalītas pieejas shēmu [LAJ 2009]. Pamatojoties uz shēmas darbības aprakstu, katru reizi, kad sistēmai ir nepieciešams pārraidīt datus, tā veic šādus darbības soļus: izvēlas nejaušo laika intervālu, pārbauda kanāla noslodzi (Clear Channel Assignment – CCA). Standartā [IEE 2015] ir definēta noildzes formula:

$$t_{wait}(T) = R * aUnitBackOffPeriod, \quad (2.6)$$

kur R - ir gadījuma skaitlis diapazonā $[0..2BE-1]$, kas tiek ģenerēts katru reizi darbības sākumā. $aUnitBackOffPeriod$ – ir konstanta vērtība, kas ir vienāda ar 20 simbolu gariem taktiem.

Ja kanāls ir pieejams, sistēma pārraida informāciju, pretējā gadījumā tā gaida jauno laiku. Sliktākajā gadījumā, kad mainīgā R vērtība būs vienāda ar 7, gaidīšanas laiks t_{wait} būs vienāds ar 2.24 ms. Kanāla noklausīšanas laiks t_{CCA} noslodzes pārbaudei ir nemainīgs un, izmantojot izvēlēto IEEE 802.15.4 standartu, ir vienāds ar 8 simbolu taktiem vai 128 ms.

IEEE 802.15.4 standarta īpašību koeficienta noteikšana

Maksimālais grafika (*frame*) lietderības noslodzes izmērs ir atkarīgs no dienesta laukuma garuma [OPE 2015]. Standartā ir aprakstīts maksimālais fiziskā līmeņa grafiku garums $aMaxPHYPacketSize = 127baiti$. Ja ņem vērā minimālo adresācijas grafika tehnisko izmēru 4 baiti, tad maksimālais lietderības noslodzes koeficients būs vienāds ar 112 baitiem.

IEEE 802.15.4 standarts darbojas 2.4 GHz frekvencē ar pieļaujamo kanāla pārraides ātrumu $f = 250$ kbit/s. Rezultātā laiku, kas nepieciešams informācijas pārraidīšanai tīklā, var izrēķināt, izmantojot formulu:

$$t_{DATA}(T) = \frac{L+O}{f}, \quad (2.7)$$

kur L – pakešu skaits bitos, O - dienesta laukuma izmērs bitos.

Tehniskās informācijas pārsūtīšanas laika koeficienta noteikšana

Informācijas apstiprinājuma grafiku līmenis sastāv no 11 baitiem (88 biti) [IEE 2015]. Izmantojot formulu, aprēķinām, kāds laiks ir nepieciešams informācijas apstiprināšanai:

$$t_{ACL}(T) = \frac{88}{250} = 0.352, \quad (2.8)$$

Pirms datu pārraides apstiprinājuma nosūtīšanas tīklā IEEE 802.15.4 standartā ir definēts tehniskās aizkavēšanās laiks = 192 ms, kas ir nepieciešams ierīču pārejai no saņemšanas uz sūtīšanas režīmu [IEE 2015]. Lai ierīcei būtu pietiekams laiks saņemtās informācijas apstrādei, standartā ir definēts minimālais aizkavēšanās laiks pēc katra grafika apstiprināšanas: grafiku garumam līdz 18 baitiem ieskaitot – 288 ms, grafiku garumam virs 18 baitiem - 640 ms.

Katra grafika nosūtīšanai ierīce pakāpeniski atrodas četrās darbības stadijās – gaidīšana (WAIT), kanāla noklausīšana (CCA), grafiku pārraide (DATA), apstiprinājuma saņemšana (ACL).

Sensoru tīklam svarīgākais faktors ir darbības režīmu sadalījums. Izmantojot protokola IEEE 802.15.4 informācijas nosūtīšanas darbības stadijas sadalījumu, var secināt, ka:

- veicot kanāla noklausīšanu (CCA) un apstiprinājuma saņemšanu (ACL), sistēmas patērētā enerģija atbilst saņemšanas režīmam;
- protokola gaidīšanas laiks paredz sistēmas atrašanu aktīvajā režīmā.

Rezultātā vidējā mezgla izmantotā jauda visā informācijas sūtīšanas ciklā ir vienāda ar:

$$P_f = \frac{P_a * t_{wait} + P_{rx} * t_{CCA} + P_{tx} * t_{DATA} + P_{rx} * t_{ACK}}{t_f}, \quad (2.9)$$

kur $t_f = t_{wait} + t_{CCA} + t_{data} + t_{ACK}$.

Darbības diapazona noteikšana

Katram raidītājam ir noteikts pārraides attālums, kurā strādājot enerģijas patēriņš ir efektīvāks [OVČ 2013]. Raidītāja jauda nosaka nosūtītās informācijas veikšanas ātrumu. Pētījumā ir uzskatīts, ka sistēma darbojas vienā vidē un informācijas pārraides ātrums netiek ārēji ietekmēts. Ir zināms, ka sistēma patērē noteikto enerģiju, pārraidot informāciju uz maksimālo pieļaujamo distanci [LUO 2014]. Izmantojot Borisa Vedenskova radiosakaru signālu amplitūdas noteikšanai, ir iespēja noteikt maksimālo pieļaujamo distanci, kurā var pārraidīt informāciju.

$$E_{np} = \frac{4\pi\sqrt{P*G}}{\lambda*r^2} * h_1 * h_2, \quad (2.10)$$

Kur E_{np} - viļņu laukuma amplitūda saņemšanas punktā, P - retranslatora jaudas koeficients, G - viļņu pastiprinājuma koeficients, λ - viļņa garums, r - radiosakaru distance, h_1 , h_2 - radiosakaru antenas atrašanās augstums.

Tiek pieņemts, ka visi tīkla mezgli mūsu sistēmā izmanto vienāda tipa antenas un neizmanto papildus signāla kvalitātes pastiprinātājus, tāpēc ir iespēja izmantot vienkāršoto 2.10 formulu:

$$E_{np} = \frac{4\pi\sqrt{P}}{\lambda * r^2}. \quad (2.11)$$

Mainot tīkla mezgla distanci, ir svarīgi saglabāt signāla kvalitāti esošajā līmenī. Ir pieņemts, ka, palielinot pārraidītās informācijas distances attālumu E_{np} , vērtība netiks mainīta. Rezultātā retranslators jaudas koeficients P_k ir vienāds:

$$P_k = \frac{E_{np}^2 * \lambda^2 * r^4}{(4\pi)^2}. \quad (2.12)$$

Plānojot sensoru tīkla darbības shēmu, ir iespēja izlīdzināt tīkla elementa patērēto enerģiju, pielāgojot raidītāja jaudu un darbības rādiusu noteiktajam tīkla segmentam. Šī pieeja ļaus līdzsvarot kopējo tīkla dzīves ilgumu, samazinot atlikušās enerģijas skaitu mezglos.

Rezultātā retranslators izmantotā jauda, pārraidot informāciju tīklā, ir vienāda ar:

$$P_{tx} = \begin{cases} P_{tx}, & ja K_r \leq 1 \\ P_{tx} * \frac{E_{np}^2 * \lambda^2 * K_r^4}{(4\pi)^2}, & ja K_r > 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

kur K_r – rādiusa darbības koeficients attiecībā pret standarta darbības rādiusu.

Tīkla dzīves ilguma ietekmējošo faktoru noteikšanas modeļa komponents

Tīkla dzīves ilgums ir atkarīgs no tā, cik ilgi darbojas tā elementi. Ņemot vērā to, ka tīklos bieži ir iekļauta liekvārdība, eksistē dažādas prasības no tīkla saņemto rezultātu kvalitātei, eksistē dažādi tīkla dzīves ilguma rādītāji.

Uz strādājošo mezglu balstīts rādītājs

Tīkla darbības kopējo laiku apzīmē ar T_k^n – laiks, kurā vismaz k no n mezgliem darbojas [CHE 2004, COL 2007, KAN 2011, VLA 2009]. Šim apzīmējumam ir viens trūkums – netiek definēti tīkla mezgla veidi. Pārsvārā tīklos ir primārie mezgli, kas nodrošina datu retranslāciju un būtiski ietekmē kopējo tīkla darbību. Ja viens no “nesošiem” mezgliem pārstāj darboties, tas automātiski nozīmē, ka tīkls pārstāj eksistēt. Tieši tāpēc citos darbos [HIL 2005, RAK 2009], analizējot sistēmas dzīves ilgumu, ir definēts mainīgais m , kas nozīmē kritisko svarīgo elementu skaitu tīklā, kam visu laiku jābūt aktīviem. Piemēram, tie varētu būt tīkla klasteru vadības mezgli [SUN 2002]. Citiem mezgliem ir pielietota metrika T_k^{n-m} .

Bieži pētījumos ir izmantots gadījums, kad $k = n$. Šādā gadījumā tīkls ir uzskatīts par darbaspējīgu tik ilgi, kamēr visi tīkla mezgli ir aktīvi vai

$$T_k^n(T) = \min_{i \in V_n(T)} t_i(T), \quad (2.14)$$

kur V_n – tīkla mezglu skaits, t_i – katra mezgla dzīves ilgums.

Uz zonas pārklājumu balstīts rādītājs

Šis rādītājs ir saistīts ar sensoru tīkla pielietojumu – informācijas lielums, ko nepieciešams saņemt no noteikta tīkla segmenta. Eksistē divas pieejas uz pārklājumu balstīta rādītāja noteikšanai. Pamatojoties uz pirmo pieeju, tīkls ir uzskatīts par darbaspējīgu tik ilgi, kamēr α procentu no tīkla kopējā pārklājuma ir pārklāta vismaz ar vienu sensoru (α – pārklājums) [YE 2004]. Otrā pieeja balstīta uz liekvārdības nodrošināšanu un prasa, lai katrā tīkla segmentā būtu vismaz k – aktīvo sensoru skaits (k – pārklājums) [KWO 2009].

Lielākais uz pārklājumu balstīto rādītāju noteikšanas trūkums ir procesu sarežģītā algoritmizācija.

Uz informācijas pārraides kavēšanu balstīts rādītājs

Pamatojoties uz pētījumu, šis rādītājs ir visvairāk pielietots, strādājot ar informācijas savākšanas sensoru tīklu sistēmām. Pilna rādītāja definīcijā ir apkopota rakstā [COL 2007]. Pilnveidosim šo rādītāju, lai tas ietvertu iepriekš aprakstītās rādītāju grupas.

Ieviesīsim katras zonas tīkla darbības kvalitātes parametru Q_k noteiktajam laika intervālam t . Pieņemsim, ka $N_k(t)$ – diapazonā k kopējais notikumu skaits t laika intervālā un $I_k(t)$ – kopējais notikumu skaits no $N_k(t)$ kopas, kas ir piegādāts līdz datu savācējam noteiktajā laika posmā. Kopējais laiks t ir definēts visam diapazonam k . Parametrs Δt_k ir definēts, pamatojoties uz tīkla nepieciešamo intensitāti noteiktajā tīkla segmentā. Rezultātā zonā k laika intervālā t tīkla darbības kvalitātes rādītājs būs vienāds:

$$Q_k(t) = \begin{cases} \frac{I_k(t)}{N_k(t)}, & \text{ja } N_k(t) \neq 0 \\ 1, & \text{ja } N_k(t) = 0 \end{cases}. \quad (2.15)$$

Darbojoties tīklam, eksistē robežvērtība c_k , kas norāda zemāko kvalitātes koeficienta Q_k vērtību, zem kura tīklu nevar uzskatīt par darbspējīgu. Tad par iespējamo tīkla darbības ilgumu var uzskatīt:

$$\forall t < \tau_1, \forall k \in [1, 2, \dots, m], Q_k(t) \geq C_k, \quad (2.16)$$

kur C_k – lietotāja definēta zemākā robeža koeficientam Q_k .

Tīkla topoloģijas maiņas laika rādītājs

Darbojoties tīklam, eksistē laiks, kad, pamatojoties uz ārējiem faktoriem vai enerģijas trūkumu dažādos tīkla elementos, sistēma nav spējīga veikt savu uzdevumu un ir nepieciešama tīkla topoloģijas maiņa.

Definēsim laika punktu kopu N , kas norāda brīdi, kad sistēma pāriet c_k robežu. Pieņemsim, ka t_{max} ir maksimālais pieļaujamais laiks (s), kurā sistēma var atrasties zem c_k diapazona, veicot nepieciešamās darbības tīkla topoloģijas maiņai. Rezultātā apskatāmā sistēma paliek aktīva tik ilgi, kamēr realizējas nosacījums:

$$t_{n+1} - t_n < t_{max}. \quad (2.17)$$

Kontrolējot kopējo tīkla vadību, nav iespējams reālajā laikā noskaidrot atlikušo enerģiju mezglos, jo tam ir nepieciešamas papildus darbības informācijas pārsūtīšanai. Vienīgais veids, lai kontrolētu mezglā dzīves spēju, ir aizkavēšanas kontrole, pārraidot informāciju. Ja sistēmas pārkonfigurēšanas laiks T ir lielāks nekā t_{max} , tad var konstatēt atsevišķo sistēmas mezglu iziešanu no ierindas.

Bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeļa izmantošanas algoritms

Apskatīsim bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas uzdevumu. Izmantosim sensoru tīklu $N = (V_n, U_n, P)$. Uzdevums ir novērtēt apskatāmā tīkla N dzīves ilgumu, zinot sākuma enerģiju visos mezglos P .

Tīkla dzīves ilgums ir atkarīgs no tīkla izvēlētās topoloģijas, ko nosaka tīkla koordinators atrašanās vieta. Pieņemsim, ka koordinators mūsu tīklā ir kustīgs un ir zināma koordinators kustības trajektorija (maršruts) tīklā - S . Rezultātā izmantosim modificēto sensoru tīkla modeli, ieviešot koordinators trajektorijas parametru - $N = (V_n, U_n, S, P)$.

Pieņemsim, ka tīkls izmanto vienādu jaudu katrā no mezglām, turpmāk formulā uzskatīsim kā sākuma enerģija mezglā $E_i = P$.

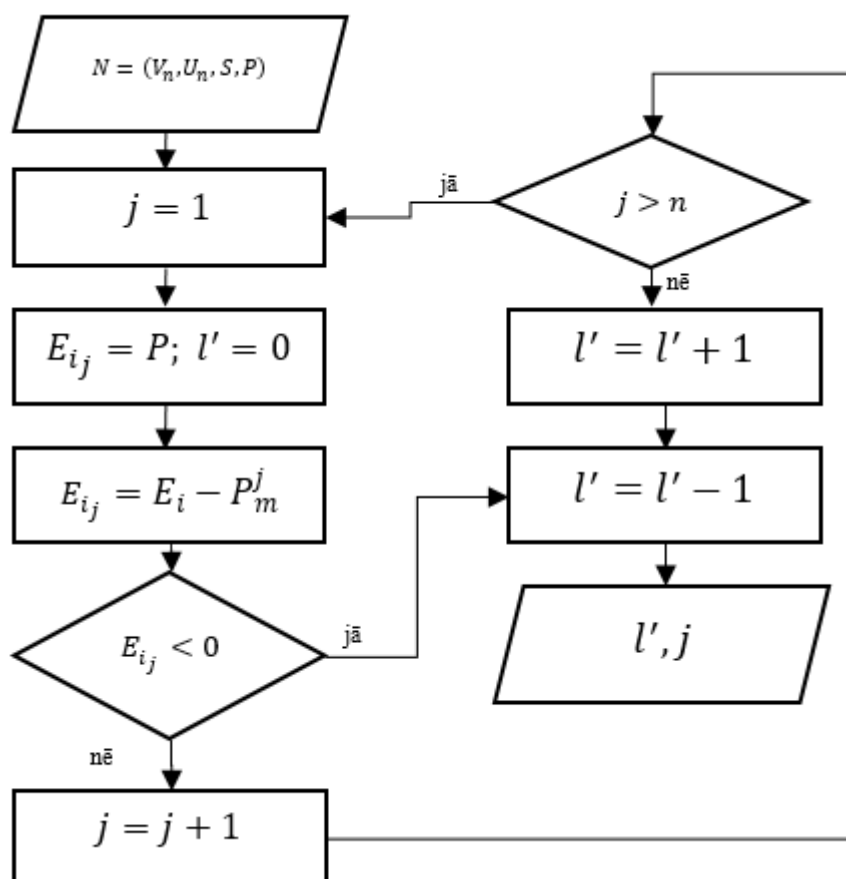
Primārais uzdevums ir aprēķināt, kāds būs tīkla mezglu enerģijas atlikums, kad koordinators savāks informāciju no l tīkla mezgliem:

$$E_{r_i}(l) = E_i - (\sum_{j=1}^l P_m), \quad (2.18)$$

kur $E_{r_i}(l)$ – mezgla l atlikusī enerģija, apskatot i mezglu skaitu.

BST dzīves ilguma novērtējums ir atkarīgs no tīkla darbības shēmas, koordinatora kustības veida un koordinatora atrašanās laika katrā pozīcijā. Tīkls pārstās darboties, kad vismaz vienā no mezgliem atlikusī enerģija $E_r \leq 0$.

Apskatīsim algoritmu (2.3.att.), kas ļauj noteikt maksimālo iterācijas skaitu tīklā līdz brīdim, kad vismaz viens no mezgliem pārtrauks darbu.



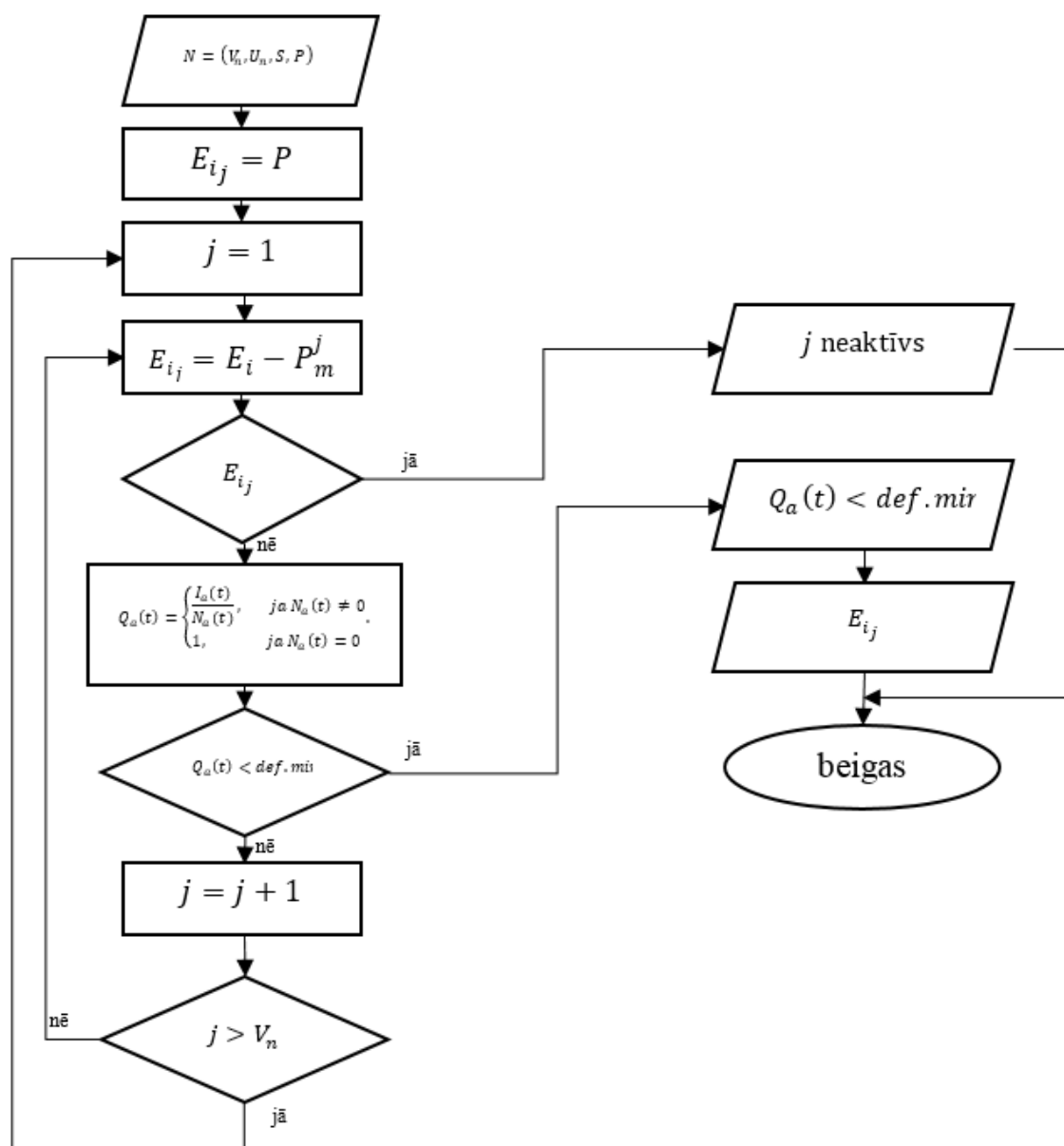
2.3. att. Tīkla maksimālā iterācijas skaita noteikšanas algoritms

Rezultātā algoritms norāda uz maksimālo iterācijas skaitu, ko tīkls var izpildīt ar nosacījumu, ka dati ir savākti, katru reizi koordinatora mezglam aktivizējoties tīklā vai mainot pozīciju tīklā.

Apskatīsim gadījumu, kad nav iespējams paredzēt koordinatora pārvietošanas iespēju un laiku, cik ilgi koordinators atradīsies katrā pozīcijā. Ja ir iespēja mainīt koordinatora atrašanās laiku jebkurā pozīcijā, ir nepieciešams izvēlēties tādu k pozīciju, kas ļautu tīklam efektīvi darboties bez tīkla topoloģijas maiņas pēc iespējas ilgāku Δt laiku:

$$\exists k \in \max_{j \in [1..m]} \left(\min_{i \in [1..n]} \frac{E_{r_i}}{p_j^i} \right) \quad (2.19)$$

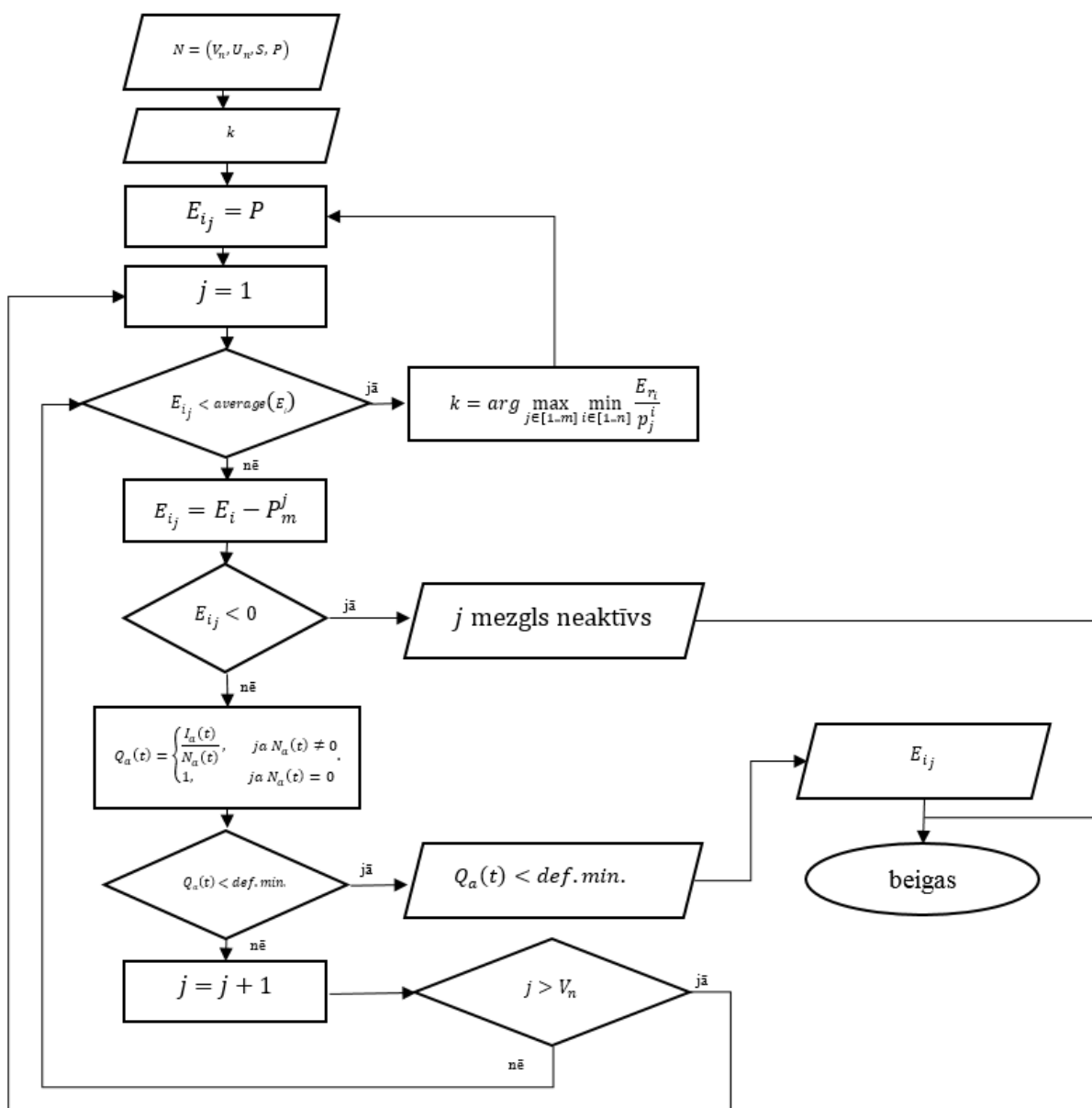
Rezultātā tīkla dzīves ilgums ar nosacījumu, ka koordinators atrodas k pozīcijā, un tīkls ir darbaspējīgs tik ilgi, kamēr visi elementi ir aktīvi $T_n^n = \min_{i \in V_n} T_i$, būs noteikts, izmantojot 2.4. attēlā esošo algoritmu.



2.4. att. Tīkla dzīves ilguma novērtēšanas algoritms bez tīkla topoloģijas maiņas

Darbojoties tīklam, eksistē laiks, kad ir nepieciešams veikt tīkla topoloģijas maiņu. Topoloģijas maiņu var veicināt koordinators atrašanās vietas maiņa tīklā un tīkla mezgla vadības modulis, kura darbība ir aprakstīta promocijas darba 3. nodaļā.

Rezultātā tīkla dzīves ilgums ar kustīgo koordinators būs noteikts, izmantojot 2.5. att. esošo algoritmu.



2.5. att. Tīkla dzīves ilguma novērtēšanas algoritms ar tīkla topoloģijas maiņu

Izpildoties dzīves ilguma novērtēšanas algoritmam, sākumā koordinators ir novietots pozīcijā k . Sākuma enerģija visiem mezgliem ir definēta BST modelī $E_{ij} = P$. Tīkls darbojas, izmantojot ģenerēto topoloģiju tik ilgi, kamēr katra mezgla atlikusī enerģija nebūs mazāka par vidējo tīkla enerģiju $E_{ij} < average(E_i)$. Nepieciešamības gadījumā tīkls veic topoloģijas maiņu, novietojot koordinators pozīcijā, kurā tīkls var darboties pēc iespējas ilgāku laiku bez topoloģijas maiņas.

3. BEZVADU SENSORU TĪKLA PĀRKONFIGURĒŠANAS METODES IZSTRĀDE

Bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metodes un algoritmu mijiedarbība

Primārais uzdevums tīkla pārkonfigurēšanas metodei ir palielināt tīkla topoloģijas izmaiņu intervāla laiku. Mūsu gadījumā to noteiks nosacījumi, kas veicinās jaunas tīkla reorganizācijas veidošanu katra darbības cikla sākumā.

Tīkla topoloģijas maiņas metožu un diagrammu mijiedarbības process sastāv:

1. Tīkla koordinators mezgla vadības metode. Strādājot sistēmai, eksistē daži ierobežojumi, kas neļauj sagatavot visu nepieciešamo informāciju tīkla dzīves ilguma novērtēšanai. Metodes sākumā notiek koordinators mezgla uzvedības noteikšana tīklā, izmantojot nosacījumus:
 - vai ir iespējams noskaidrot, kā uzvedīsies tīkla koordinators,
 - vai tīkla koordinators atrašanās vieta ir nemainīga.
2. Tīkla konfigurācijas noteikšanas posmā sistēma nosaka koordinators atrašanās vietu. Sistēma izmanto dinamisko koordinatoru, ja realizējas nosacījumi:
 - Mainās koordinators atrašanās vieta – $V_{(x,y)}^a \notin \{V_{(x,y)}^1 \cdot V_{(x,y)}^n\}$.
 - Ir konstatēta liela atlikušās enerģijas starpība tīkla elementos - $p_{min} > \max_i P_i - \min_j P_j$, kur $i, j = 1, 2, \dots, n$.
3. Gadījumā, ja koordinators ir dinamisks tīkla vadības moduļa darbības algoritms, kas pārbaudīs nepieciešamību mainīt tīkla konfigurāciju esošajā iterācijas reizē, un nepieciešamības gadījumā, izmantojot promocijas darba otrajā nodaļā izstrādāto dzīves ilguma novērtēšanas modeli, veicinās topoloģijas maiņu tīklā.
4. Gadījumā, ja koordinators ir statisks vai nav iespējams identificēt koordinators atrašanās vietu tīklā, tīkla dzīves ilguma palielināšanai ir ieviests virtuālais koordinators mezglis, kas ir vadīts, izmantojot promocijas darbā piedāvāto heuristisko metodi.

Dinamiskā koordinators mezgla vadības metode

Darbojoties sistēmai ir ieviests tīkla mezgla vadības modulis, kas kontrolē nosacījumus, kuri veicina sensoru tīkla rekonfigurāciju mezglos:

1. Mainās koordinators atrašanās vieta – $V_{(x,y)}^a \notin \{V_{(x,y)}^1 \cdot V_{(x,y)}^n\}$.
2. Ir konstatēta liela atlikušās enerģijas starpība tīkla elementos - $p_{min} > \max_i P_i - \min_j P_j$, kur $i, j = 1, 2, \dots, n$.

Darbojoties sistēmai, mezgla vadības modulim ir divi uzdevumi:

1. Nodrošināt mezglis atlikušo enerģijas uzskaiti un uzglabāšanu noteiktajā solī t_c^n .
2. Noteikt periodu t_c^n , kad ir nepieciešams veikt maršrutēšanas ceļa pārorganizāciju.

Mezgla vadības moduļa daļa atšķirībā no tīkla sensoru elementiem ir daudzfunkcionāla. Daži moduļa uzdevumi var īstenoties vienlaicīgi. Katrs izpildāmais cikls vai stāvoklis ir realizēts kā neatkarīga darbība. Mezgla vadības modulī cikliski darbojas darbību plānotājs, kas neatkarīgi no situācijas izpilda noteikto uzdevumu tīklā. Tāda pieeja ļauj koordinēt vadības moduļa darbību un vadīt katru izpildāmo procesu.

Piedāvātajā modelī katram tīkla koordinators mezglam ir lokālais mezgla vadības modulis, kas nodrošina mezglis mijiedarbību tīklā.

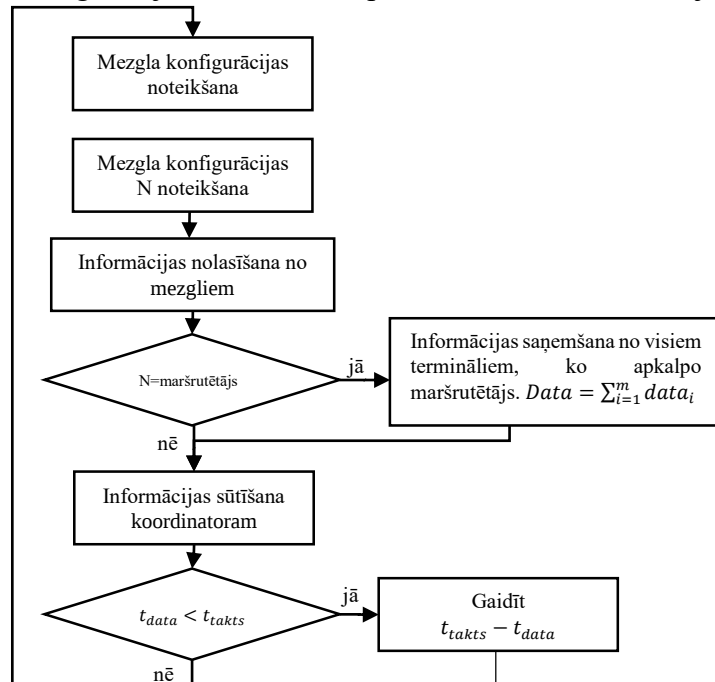
Mezgla vadības moduļa inicializācijas fāzē ir definēts kopējais tīkla mezglis komunikācijas modelis M_i saskaņā ar 3.1 formulu.

$$Mi = \{Sa, Se, Sp, L, Sra\}, \quad (3.1)$$

kur Sa - mezglu skaits $Sa = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, kas piedalās komunikācijas procesā, Se – komunikācijas vides sektoru skaits, kur notiek darbības, Sp – tīkla pārslogotu sektoru skaits, kur mezgli patērē lielāko enerģijas skaitu, L – ceļa garums no koordinatora punkta līdz mezglam tīklā, Sra – maršrutēšanas mezglu skaits ceļā, ko mezgla vadības modulis izmantos informācijas pārraidīšanai vadības mezglam.

Mezgla modulim darbojoties cikliski, atkarība no mezgla darbības stāvokļa noteikta informācijas intensitātē starp mezgļiem Mi .

3.1.attēlā esošā algoritma izmantošana rezultātā var samazināt kopējo BST dzīves ilgumu, jo situācija, kad koordinators tīklā paliek nemainīgs $V_{(x,y)}^a = V_{(x,y)}^{a+1}$ vai novietots pozīcijā $V_{(x,y)}^a$, kur pastāv vienīgā tīkla iespējamā konfigurācija $k \rightarrow \max(R_{iN})$, enerģija būs nelietderīgi iztērēta uz konfigurācijas veidošanu, tāpēc tiks izveidota sākotnējā topoloģija.



3.1.att. Alternatīvais tīkla mezglu darbības algoritms

Mezgla vadības moduļa ieviešana tīklā ļaus uzlabot tīkla darbību, samazinot mezgla noslodzi informācijas apstrādes laikā, kā arī ļaus reaģēt uz tīklā esošajām izmaiņām reālajā laikā, jo modulis darbojas neatkarīgi no mezgla stāvokļa un enerģijas.

Datu plūsmas vadības metode

Reāli strādājošai sistēmai nav iespējams iegūt visu nepieciešamo informāciju bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanai. Dažas tīkla modeļa bāzes vērtības, piemēram, retranslators jauda, var mainīties atkarībā no laika, cik sistēma paliek aktīva, un ārējās vides, kurā sistēma darbojas. Apskatīsim dažus piemērus, kad nav iespējams precīzi definēt nepieciešamos parametrus tīkla dzīves ilguma novērtēšanai:

- Dažos tīkla segmentos ir tehniskie traucējumi, kas samazina pārraidītās informācijas kvalitāti. Tas var būt saistīts ar cita tīkla darbību tajā pašā reģionā, kas izmanto līdzīgu vai blakus esošu frekvenci.
- Ārējo klimatisko faktoru ietekme uz autonomo barošanas avotu, kas var palielināt enerģijas patēriņu gaidīšanas režīmā.

Piemēram, katram no v mezgliem ir definēts blakus esošo objektu skaits $N(v) \subset V$, kas var sazināties ar v mezglu. Ģenerējot ceļu, tīklā ir izmantota platjoslu datu retranslācija [KUM 2005], informācija vienlaikus ir pārraidīta no $N(v)$ mezgla uz visu tīklu.

Promocijas darbā ir piedāvāts šāds datu plūsmas pārvietošanas algoritms tīklā. Mezglis V , saņemot pārraidīto informāciju no mezgla S , kas ir paredzēta saņēmēja mezglam D , pielieto šādu darbību secību:

- No $N(v)$ kopas ir izvēlēta un sakārtota pēc prioritātes potenciālā retranslatoru kopa $R(v, d) \subset N_v$.
- Potenciālā retranslatoru kopa pieder mezglu kopai $R(v, d) \in N_v$ un nosaka mezgla v darbības stratēģiju.
- Informācija par mezgla funkcionalitāti ir ierakstīta dienestā pārraides pakešu laukā un nogādāta tīkla vadības modulim.

Nosakot retranslācijas prioritātes, ir ņemts vērā atlikušās enerģijas lielums katrā konkrētajā mezglā. Mezgla darbības vadības modulis izvēlas retranslatoru ar lielāko atlikušo enerģiju E_0 mezglā. Ceļa veidošanas algoritms pilnībā noslēdz savu darbību tad, kad ir sasniegts saņēmēja mezgls d .

Darbā ir minēts, ka katrs tīkla elements var darboties divos režīmos (termināls vai maršrutētājs). Lai sadalītu uzdevumu tīklā, pārkonfigurācijas stadijas sākuma posmā katrs mezgls atrodas noklausīšanās režīmā. Noklausīšanās laikā ir izvērtēts tīkla mezgla atlikušās enerģijas lielums E_0^n .

Bezvadu sensoru tīkla ceļš no termināla s līdz koordinatoram d - $S(s, d)$ ir kokveidīga struktūra, kas ir būvēta, izmantojot rekursīvo pieeju no termināla uz koordinatoru. Pirmajā stadijā ir definēta tīkla iespējamo maršrutētāju kopa $R(s, d) \in N(s)$. Tas ļaus aprakstīt ceļu $S(s, d)$, kas sakārto apakšceļu sarakstu:

$$S(s, d) = [S(v_1, d), \dots, S(v_n, d)], v_j \in R(s, d) \quad (3.2)$$

Nākamais solis ir izveidot katram maršrutētājam lokālo darbības stratēģijas $R(v_j, d)$ kopu. Rezultātā katru apakšceļu sarakstu var pilnveidot :

$$S(v_j, d) = [S(v_{j,1}, d), \dots, S(v_{j,m}, d)], v_{j,i} \in R(v_j, d). \quad (3.3)$$

Ceļu no termināla līdz koordinatoram var attēlot kā otrā līmeņa ielikto saraksta koku:

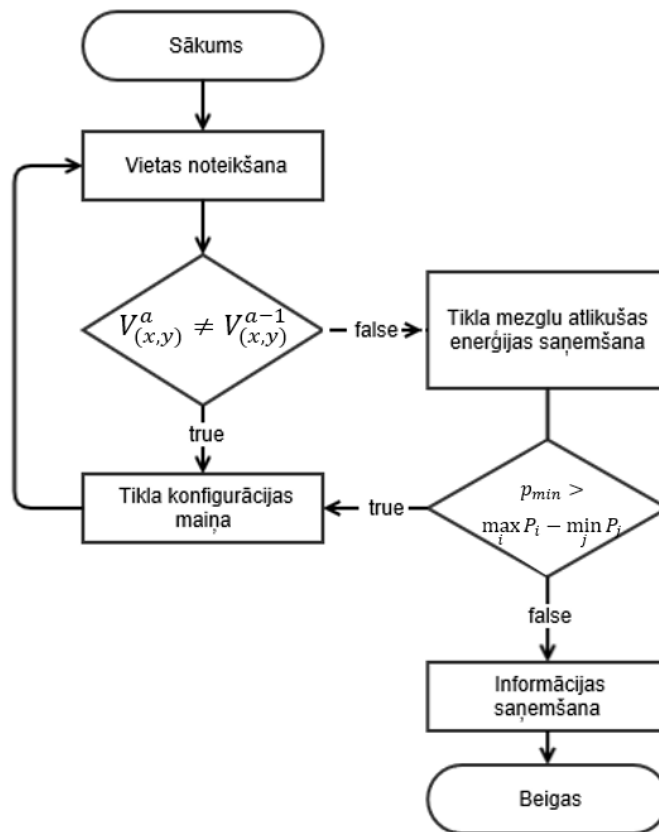
$$S(s, d) = \left[[S(v_{1,1}, d), \dots, S(v_{1,m_1}, d)], \dots, [S(v_{n,1}, d), \dots, S(v_{n,m_n}, d)] \right]. \quad (3.4)$$

Veidojot maršrutu, tā līmenis ir paplašināts tik ilgi, kamēr maršrutētāju sarakstā nepaliks vienīgais koordinators d mezgls.

Mūsu gadījumā sensoru tīkla segments ir aprīkots ar vienīgo koordinators mezglu. Turpmāk uzskatīsim, ka saņēmēja mezgls d (koordinators) ir fiksēts, un neizmantosim to formulās.

Ieviesīsim ceļu kombinēšanas procedūru. Pieņemsim, ka $S(v)$ – ceļš no mezgla v uz koordinatoru maršrutētāju sarakstā $R(v) = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, kur neeksistē mezgls u . Pieņemsim, ka $S(u)$ ir ceļš, kas sastāv no izslēgtiem saraksta $R(v)$ mezgliem.

Izveidosim ceļu, kas izmanto kombinēto sarakstu $S(v) \in S(u)$, kur u mezgli ir izmantoti ar zema līmeņa koeficientu - $R(v) = (v_1, v_2, \dots, v_n, u)$.



3.2.att. Tīkla mezgla vadības moduļa darbības algoritms

Darbojoties sistēmai (3.2. att.), mezgla vadības modulim ir divi uzdevumi:

- nodrošināt mezglos atlikušās enerģijas apkopojumu un uzglabāšanu noteiktajā solī t_c^n .
- noteikt periodu t_c^n , kad ir nepieciešams veikt maršrutēšanas ceļa pārorganizāciju.

Mezgla vadības moduļa daļa atšķirībā no tīkla sensoru elementiem ir daudzfunkcionāla. Daži moduļa uzdevumi var īstenoties vienlaicīgi. Katrs izpildāmais cikls vai stāvoklis ir realizēts kā neatkarīga darbība. Mezgla vadības modulī cikliski darbojas darbību plānotājs, kas neatkarīgi no situācijas izpilda noteikto uzdevumu tīklā. Tāda pieeja ļauj koordinēt vadības moduļa darbību un vadīt katru izpildāmo procesu.

Piedāvātajā modelī katram tīkla koordinators mezglam ir lokālais mezgla vadības modulis, kas nodrošina mezgla mijiedarbību tīklā.

Virtuālā koordinators vadības metode ar heiristisko algoritmu

Strādājot ar reālajām sistēmām, eksistē daži ierobežojumi, kas neļauj sagatavot visu nepieciešamo informāciju sistēmas dzīves ilguma modelēšanai:

- nav iespējams noskaidrot, kā uzvedīsies tīkla koordinators, vai tas būs nemainīgs, vai izmantos paredzamo kustības trajektoriju vai gadījuma atrašanās vietu,
- mezgla izmantotā jauda p_k^i ar laiku var mainīties.

Tālāk darbā ir aprakstīti daži piemēri, kad nav iespējams izmantot piedāvāto bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeli.

1. Signāla traucējumi dažās tīkla pārklājuma zonās.
2. Tīkla elementu pārkonfigurācija.
3. Klimatisko apstākļu ietekme uz mezgla funkcionēšanu.

Var secināt, ka strādājot tīklam, pastāv situācijas, kad fiziskais koordinators mezgls nav sasniedzams vai nav iespējams izveidot komunikācijas maršrutu starp sensoru mezglu un koordinatoru. Rezultātā pieaug enerģijas patēriņš, nodrošinot neefektīvu komunikāciju starp termināla mezgliem un koordinatoru. Lai palielinātu tīkla dzīves ilgumu, ieviesīsim virtuālo koordinators mezglu, kas cikliski pārvietojas tīklā, izmantojot zināmo kustības trajektoriju.

Virtuālā koordinators darbības algoritma aprakstam ieviesīsim papildus apzīmējumus: $S(k)$ - grafa G_s virsotņu kopa, kas ietver virsotnes k un k blakus virsotnes:

$$S(k) = \{k\} \cup \{j: (k, j) \in E_s\}. \quad (3.5)$$

$S(k)$ – mezglu skaits, kas fiziski ir pieslēgts virtuālajam koordinators mezglam k un atrodas tā tuvumā:

$$D(k) = \{i \in V_n: (u, i) \in E_n(k), \text{ kur } u \in V_n - \text{koordinators mezgls}\}. \quad (3.6)$$

Katrā n solī, koordinators atrodas kādā no p_n pozīcijām, izvēlas jaunu pozīciju no $S(p_n)$ saraksta, pamatojoties uz atlikušo enerģiju mezglos, nākamajam solim p_{n+1} . Ja tīkla vadības modulis veicina tīkla topoloģiju maiņu, koordinators maina savu atrašanās vietu. Atrodies jaunajā vietā, virtuālais koordinators apstrādā mezglā esošo informāciju, pavadot tajā t_s laiku, ko definē lietotājs. Galvenais algoritma solis ir nākamās pozīcijas p_{n+1} izvēle. Pārsvarā tas ir izpildīts, izmantojot kādu no heuristikas metodēm.

Literatūrā tika piedāvātas dažādas heuristikas metodes [BAS 2007, BLO 2002, MAU 2011]. Par visvienkāršāko metodi ir uzskatīta gadījuma pozīcijas izvēle no iespējamo pozīciju saraksta: $p_{n+1} = \text{random}(S(p_n))$. Pamatojoties uz autoru darbos [BLO 2002] veiktajiem modelēšanas rezultātiem, var redzēt, ka vairumā pētījumu scenārijos salīdzinājumā ar nemainīgo koordinators atrašanās vietu palielina BST dzīves ilgumu. Neskatoties uz labiem pētījuma rezultātiem, šo metodi nav ieteicams izmantot, jo tīkla koordinators pārvietošana, izmantojot gadījuma pozīcijas noteikšanu, negarantē nekādus rezultātus, un dažās situācijās, kad koordinators būs novietots mezglos, kuros ir zems atlikušās enerģijas lielums, samazinās tīkla dzīves ilgums.

Viena autora darbā [MAU 2011] tika piedāvāts nodrošināt koordinators pārvietošanu pa apskatāma tīkla perimetru. Šī pieeja balstās uz to, ka pārsvarā, darbojoties tīklam, elementiem, kas atrodas tīkla centrā, ir zemāks atlikušās enerģijas lielums mezglos.

Piedāvātā metode, novietojot koordinators mezglu tīkla perimetrā, ļauj noslogot mezglus, kuros atlikušās enerģijas lielums ir lielāks.

Basagni savos darbos piedāvā izmantot MRE (Maximum Residual Energy) [BAS 2007] koordinators kustības algoritmu. Koordinators mezgls, izmantojot GMRE algoritmu, noskaidro blakusesošo mezglu atlikušo enerģiju un izvēlas vienu mezglu ar vislielāko atlikušās enerģijas lielumu tajā. Šajā gadījumā koordinators kustības plānošana ir piesaistīta maksimālas atlikušās enerģijas meklēšanai mezglos. Eksistē dažas funkcijas E_k veidi, kas ļauj noteikt koordinators k atrašanās vietu:

1. $E_k(t) = \frac{1}{|D(k)|} \sum_{j \in D(k)} E_{rj}(t);$
2. $E_k(t) = \min_{j \in D(k)} E_{rj}(t);$
3. $E_k(t) = \max_{j \in D(k)} E_{rj}(t).$

Neatkarīgi no tā, kā ir definēta funkcija E_k , atlikusī enerģija tikai daļēji raksturo kopējo tīkla stāvokli un tas nevar būt izmantots kā vienīgais nosacījums. Piemēram, mezgls ar mazāko atlikušo enerģiju E_0 un mazāko enerģijas patēriņu var strādāt ilgāk nekā mezgls ar lielāko E_0 un lielāko enerģijas patēriņu. MRE metodes pielietošana tikai novieto koordinators mezglu

pozīcijā ar lielāko E_0 vērtību, gadījumā, ja tīkla vadības modulis neveicina jauno topoloģijas maiņu, tad šī metode nepalielinās kopējo tīkla dzīves ilgumu.

Promocijas darbā ir piedāvāta alternatīva metode. Katrā darbības solī izvēlēties tādu virtuālā koordinators atrašanās vietu p_n , kas ļauj tīklam strādāt pēc iespējas ilgāk ar nosacījumu, ka tīkla topoloģija netiks mainīta. Izmantojot analoģu, definēsim jaunas metodes nosaukumu MREML (Maximum Residual Energy Maximal Lifetime)

$$E_k(t) = \arg(\max_{k \in S(p_n)} \min_{n \in D(k)} \frac{E_0^n(t)}{p_k^n(t)}), \quad (3.7)$$

kur p_k^n – mezgla k kopējā izmantotā jauda darbības ciklā.

Kopējo tīkla mezgla patērēto enerģiju ir iespējams aprēķināt, izmantojot otrajā nodaļā aprakstīto metodi, vai mainīt dinamiski, pamatojoties uz ārējiem faktoriem. Ja laiks, ko koordinators pavada katrā no k mezglu pozīcijām, ir vienāds ar t_k un ir zināma mezglu atlikusī enerģija, pirms koordinators novietots attiecīgajā pozīcijā $-E_0^n(t)$, un enerģijas lielums mezglā, kad koordinators atstās pozīciju $-E_0^n(t + t_k)$, tad katra mezgla patērēto enerģiju var izteikt, izmantojot formulu:

$$p_k^n = \frac{E_0^n(t) - E_0^n(t + t_k)}{t_k}. \quad (3.8)$$

MRE atšķirībā no MREML metodes izmanto tīkla mezglu lokālo informāciju par atlikušo enerģiju, kas regulāri prasa papildus enerģiju, veicot atlikušās enerģijas analīzi blakus esošiem mezgliem. Promocijas darbā piedāvātā metode izmanto tīkla mezgla vadības moduli un statisko koordinators mezglu informācijas glabāšanai. Tāda pieeja ļauj tīkla topoloģijas maiņas gadījumā saņemt globālo pārskatu par visu tīkla konfigurāciju un virtuālajam koordinators mezglam ieņemt labāko pozīciju informācijas savākšanai no mezgliem.

4. UZ MODELĒŠANAS BALSTĪTA BEZVADU SENSORU TĪKLA DZĪVES ILGUMA NOVĒRTĒŠANAS MODEĻA UN METOŽU EKSPERIMENTĀLA VALIDĀCIJA

Bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu eksperimentālā aprobācija, izmantojot fizisko tīklu

Bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu eksperimentālai aprobācijai promocijas darbā ir realizēti trīs fiziskie eksperimenti:

1. Tīkla pārkonfigurēšanas metodes aprobācija, izmantojot tīklu ar statisko koordinators mezglu.
2. Eksperiments tīkla mezglu tehnisko parametru noteikšanai, izmantojot BST dzīves ilguma novērtēšanas modeli.
3. Bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu pielietojums tīklā ar dinamisko koordinators mezglu.

Tīkla pārkonfigurēšanas metodes aprobācija, izmantojot tīklu ar statisko koordinators mezglu, eksperimenta scenāriju apraksts

Izmantojot Klimata pārmaiņu finanšu instrumenta līdzfinansējumu projektā “Atjaunojamo energoresursu izmantošana mājāsaimniecību sektorā”, sadarbībā ar SIA “Moderator” privātmājā tika pieslēgta apkures sistēma, kas izmanto alternatīvus un atjaunojamus resursus enerģijas ražošanai.

Projekts tika īstenots pēc dzīvojamās ēkas nodošanas ekspluatācijā, kad visi iekšējie darbi bija pabeigti, kas neveda iespēju izmantot sensorus ar pastāvīgiem barošanas avotiem un pieslēgumu pie fiziskā datoru tīkla. Projekta ietvaros uzstādītā autonoma apkures un karstā ūdens sagatavošanas sistēma darbojas, izmantojot vairākus temperatūras, ūdens plūsmas un spiediena sensorus centrālo katlu mezglu un sūkņu grupas vadībai. Sensoru automatizācija ir realizēta ar mērķi samazināt enerģijas patēriņu (siltuma enerģija un elektroenerģija) sistēmas darbības laikā.

Eksperimenta mērķis

1. Pārbaudīt promocijas darbā piedāvāto bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metodi, izmantojot uzbūvēto ūdens / gaisa temperatūras, ūdens plūsmas un ūdens spiediena sensoru tīklu.
2. Pārbaudīt plaši pielietotās akumulatora tilpuma palielināšanas metodes efektivitāti.
3. Novērtēt dzīves ilguma pieaugumu, mainot tīkla topoloģiju.

Eksperimentā apskatāmais objekts

Apskatāmais objekts – Syxthsense firmas bezvadu sensoru tīkls, kas sastāv no 54 termināla mezgliem Syxthsense TX-VTRX TX, 17 maršrutētājiem Syxthsense SST-RXTX-P306 un 1 koordinators mezgla ModBusMaster RX JaCe. Darbības rādīšanas koeficients visiem mezgliem = 1, mezgla retranslators izmanto On/Off darbības režīmu, radiouztvērēja modulis darbojas ar pastāvīgo jaudu. Katrs mezgls darbojas, izmantojot 2x1.5V (AA) tipa akumulatorus. Tīkla topoloģija ir definēta manuāli un ir pastāvīga visam tīkla darbības laikam. Tīklā maršrutētāji var savienoties ar koordinators mezglu vai jebkuru citu maršrutētāja mezglu tīklā.

Eksperimenta norises laiks

Eksperiments tika veikts trīs posmos:

- Pirmais posms – 2012. gada septembris – 2013. gada maijs. Apskatāmā perioda laikā tika izmantota ražotāju uzstādīta BST mezglu konfigurācija, automātiski, uzstādīšanas laikā ģenerēta tīkla topoloģija, BST autonoma darbības ilguma novērtēšanai.
- Otrais posms – 2013. gada septembris – 2014. gada maijs. Apskatāmā perioda laikā tika izmantota ražotāju uzstādīta BST terminālu mezglu konfigurācija, maršrutētāju mezgliem tika palielināts akumulatoru tilpums, tīkls darbojās, izmantojot pirmajā posmā ģenerēto tīkla topoloģiju.
- Trešais posms - 2014. gada septembris – 2015. gada maijs. Apskatāmā perioda laikā tika izmantota ražotāju uzstādīta BST mezglu konfigurācija ar rūpnieciski piedāvāto barošanas avotu. BST tīkla topoloģija tika mainīta manuāli katra mēneša sākumā, izmantojot promocijas darbā piedāvāto metodi MREML.

Eksperimenta ieejas dati

Eksperiments notika, izmantojot vienu sistēmu trīs gadu laikā. Tehniskās BST īpašības eksperimentu laikā netika mainītas, sistēma darbojās, izmantojot pirmajā gadā definēto determinēto darbības struktūru. Rezultātā var uzskatīt, ka mezglu patērēto enerģiju katrā darbības stāvoklī un laiku, kad sistēma atrodas katrā stāvoklī, var uzskatīt par konstantu vērtību.

Eksperiments notika vienā vietā, ko raksturo nemainīga, iepriekš uzstādīta gaisa temperatūra iekštelpās, vienāds cilvēku skaits, kas izmanto ūdeni, sistēmas ieslēgšanas laiks 1. septembrī, izslēgšanas laiks līdz 20. maijam. Vienīgais ārējais faktors, kas var ietekmēt BST, kas apkalpo apkures un ūdens sagatavošanas sistēmu, ir gaisa temperatūra ārpus telpas.

Lai eksperimentu varētu uzskatīt par notikušu, pamatojoties uz 4.1. tabulu definēsim apskatāmo laika intervālu, kad trīs gadu laikā vidējā Latvijas gaisa temperatūras starpība vienā

mēnesī ir nenožīmīgas [LAT 2015]. Tas nosaka, ka efektīvākais rezultātu apkopošanas laiks ir katra gada sistēmas darbības pirmie trīs mēneši.

4.1. tabula.

Vidēja gaisa temperatūra Latvijā

	2015	2014	2013	2012
Janvāris	-0,7 °C	-6,1 °C	-6,2 °C	-3,4 °C
Februāris	-0,2 °C	+0,4 °C	-2,2 °C	-8,8 °C
Marts	+3,4 °C	+3,4 °C	-5,5 °C	+0,9 °C
Aprīlis	+5,9 °C	+7,2 °C	+4,0 °C	+5,9 °C
Maijs	+11,9 °C	+12,0 °C	+14,4 °C	+11,7 °C
Jūnijs		+13,8 °C	+17,6 °C	+13,9 °C
Jūlijs		+19,7 °C	+17,8 °C	+18,2 °C
Augusts		+17,3 °C	+17,1 °C	+15,9 °C
Septembris		+12,7 °C	+11,9 °C	+13,0 °C
Oktobris		+6,5 °C	+8,1 °C	+6,9 °C
Novembris		+2,3 °C	+4,7 °C	+4,0 °C
Decembris		-0,9 °C	+2,2 °C	-4,8 °C

BST dzīves ilguma etalona vērtības noteikšana

Par etalona vērtību uzskatīsim pirmā gada tīkla darbības laiku t_{st} . Uzskatīsim, ka bezvadu sensoru tīklu var uzskatīt par aktīvu tik ilgi, kamēr visi mezgli ir aktīvi.

Ieviesīsim tīkla darbības efektivitātes koeficientu δ_w , kas norāda uz tīkla dzīves ilguma pieaugumu procentos:

$$\delta_w = \left(\frac{t}{t_{st}} - 1 \right) * 100\%, \quad (4.1)$$

kur t – tīkla dzīves ilgums apskatāmajā posmā.

Ieviesīsim sistēmas ieviešanas un izmantošanas izmaksas lietderības koeficientu δ_c :

$$\delta_c = \left(\frac{C_{st}/t_{st}}{C/t} - 1 \right) * 100\%, \quad (4.2)$$

kur C – sistēmas izmaksas apskatāmajā periodā, C_{st} – etalona modeļa sistēmas izmaksas.

Ieviesīsim pārkonfigurēšanas metožu darbības noteikšanas kļūdas koeficientu δ_m , kas norāda uz promocijas darbā aplūkotās dzīves ilguma noteikšanas metodes precizitāti procentos attiecībā pret reāli strādājošu sistēmu.

$$\delta_m = \left(\frac{t'}{t_{st}} - 1 \right) * 100\%, \quad (4.3)$$

kur t' – tīkla dzīves cikls, kas ir aprēķināts, izmantojot promocijas darba 2. nodaļā aprakstīto modeli. Eksperimenta rezultāti ir apkopoti 4.2. tabulā.

4.2. tabula

Eksperimenta ar nemainīgo koordinātoru rezultātu apkopojums

t_{st}	624						
E_0	Akumulatora izmaksas	Akumulatora palielināšanas metode	Manuāla tīkla topoloģijas maiņa izmantojot Deikstra algoritmu	t'	δ_w	δ_c	δ_m
18 KJ	2 x 0,79 EUR		696	642	11,54%	11,54%	3%
27 KJ	3 x 0,79 EUR	864	912	912	38,46%	-7,69%	6%
36 KJ	4 x 0,79 EUR	984	1072	1082	57,69%	-21,15%	10%

Eksperimenta rezultātu apkopojums

1. Akumulatoru palielināšanas metode deva lielu dzīves ilguma pieaugumu - δ_w , bet izrādījās ekonomiski neefektīva - δ_c . No tā var secināt, ka izmantojot akumulatora tilpuma palielināšanas metodi - jo lielāks ir dzīves ilguma pieaugums, izmantojot akumulatora tilpuma palielināšanas metodi, jo lielākas ir sistēmas izmaksas.
2. Izmantojot tīkla topoloģijas maiņu visos gadījumos, ir redzams reālais tīkla dzīves ilguma pieaugums ar vienādām akumulatora izmaksām. No tā var secināt, ka BST pārkonfigurēšanas modelis darbojas, bet darbības efektivitātes palielināšanai jāizmanto promocijas darbā piedāvātā autonomā metode.
3. Darbā redzams, ka, izmantojot bezvadu sensoru tīkla rūpnieciskus parametrus, BST pārkonfigurēšanas metode darbojas korekti. Var uzskatīt, ka kļūdas koeficients δ_m - 3% nav nozīmīgs. Gadījumos, kad sistēmas tehniskie parametri daļēji tika nomainīti, aprēķinu kļūdas koeficients δ_m būtiski pieauga. To var izskaidrot ar nelietderīgo vai neuzskaitīto enerģijas izmantošanu mezglos gadījumā, kad bez adaptācijas ir mainīta rūpnieciska mezglu konfigurācija.

Eksperiments tīkla mezglu tehnisko parametru noteikšanai, izmantojot BST dzīves ilguma novērtēšanas modeli

Otrā eksperimenta laikā tika izmantoti gatavi bezvadu sensoru tīkla tehniskie risinājumi un promocijas darba laikā izstrādātais ūdens piegādes uzskaites un centralizēto atslēgšanu sistēmas prototips, kas ir uzstādīts privātajā sektorā Saulkrastos sadarbībā ar SIA "Saulkrastu komunālserviss". Sistēmā, kurā veikts eksperiments, ir 1 koordinators, 8 maršrutētāji un 236 tīkla mezgla elementi, kas pilda termināla funkcijas ar DAP un Ankor moduļiem, nolasot informāciju par ūdens plūsmas ātrumu un temperatūru, un nepieciešamības gadījumā kontrolē NC tipa vārstu.

Maršrutētāju mezgli nepārtraukti ir pieslēgti barošanas avotam, bet paralēli ir aprīkoti ar rezerves 12V akumulatoru informācijas nolasīšanai ziemas laikā ar samazinātu takts frekvenci. Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt tīkla autonomas darbības palielināšanas iespēju elektrības atslēgšanas gadījumā, izmantojot tīkla pārkonfigurācijas metodi. Tīkla elementu pārkonfigurācija tika nodrošināta, izmantojot izstrādāto programmatūras nodrošinājumu, kas ļauj veikt tīkla topoloģijas maiņu.

Eksperimenta laikā izmantotā prototipa tehniskais raksturojums

Praktiskajā darbā tika izstrādāts bezvadu sensoru mezgls ar iespēju izmantot adaptīvo konfigurāciju tīkla topoloģijas veidošanai.

Tabulā 4.3. ir parādīta moduļa tehniskā specifikācija:

4.3. tabula

Izmantotā ATmega328 mikro kontroliera tehniskās īpašības

Parametrs	Vērtība
Ārējā atmiņa	32 kbytes
Iekšējā atmiņa	2 kbytes
Konvektoru skaits	28
Maksimālā darbības frekvence	20MHz
CPU	8-bit AVR

Tabulas 4.3. turpinājums

Uzglabāto mērījumu skaits	<390
Radio uztvērējs	2400MHz līdz 2483,5 MHz ar programmējamo soli 1MHz.
Pārsūtamais (TX) ātrums	250kbps
Darbības diapazons	<250 metriem
Izmantotā jauda saņemšanas režīmā	19.7 mA
Izmantotā jauda TX, -10 dBm	11 mA
Izmantotā jauda TX, -5 dBm	14 mA
Izmantotā jauda TX, 0 dBm	17.4 mA
Izmantotā jauda gaidīšanās režīmā	20 μ A
Izmantotā jauda gulēšanas režīmā	1 μ A

Otrā eksperimenta mērķis

1. Pārbaudīt BST dzīves ilguma novērtēšanas modeļa izmantošanu tīkla mezglu tehnisko parametru noteikšanai.
2. Novērtēt dažādu darbības režīmu attiecību ietekmi uz BST dzīves ilgumu.

Apskatāmais objekts

Apskatāmais objekts – DIYPower firmas un HYDROlink bezvadu sensoru tīkls, kas sastāv no 236 termināla mezgliem DIYPowe FS4001A G1, 8 maršrutētājiem HYDROlink RFMTXE un 1 koordinatora mezgla MBUS Master Unit HYDROlink. Darbības rādiusa koeficients visiem mezgliem = 1, radiouztvērēja modulis darbojas ar pastāvīgo jaudu. Katrs mezgls darbojas, izmantojot pastāvīgo barošanas avotu un rezerves 12V tipa akumulatorus. Tīkla topoloģija ir definēta manuāli un ir pastāvīga visam tīkla darbības laikam. Tīkla maršrutētāji var savienoties ar koordinatora mezglu vai jebkuru citu maršrutētāja mezglu tīklā.

Eksperimenta laiks

Eksperiments tika veikts divu gadu garumā un ir sadalīts divos posmos:

- Pirmais posms – 2010. gada jūnijs – 2011. gada jūnijs. Sistēmas projektēšana, uzstādīšana un tehniskā parametru adaptācija, izmantojot promocijas darbā piedāvāto BST tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeli.
- Otrais posms – 2011. gada jūnijs – 2013. gada 16. jūnijs. Tīkla topoloģijas veidošana un ieviešana.

Eksperimenta ieejas dati

Eksperiments notika, izmantojot vienu sistēmu trīs gadu laikā. Tehniskās BST īpašības eksperimentu laikā netika mainītas, sistēma darbojas, izmantojot otrajā gadā definēto determinēto darbības struktūru un algoritmu. Rezultātā var uzskatīt, ka mezglu izmantotā jauda katrā darbības stāvoklī un laiks, kurā sistēma atrodas katrā stāvoklī, ir konstanta vērtība.

Eksperiments notika vienā vietā, visiem termināla mezgliem tika definēta identiska sākotnējā konfigurācija un tīkla topoloģija. Lai novērstu ārējo faktoru iedarbību uz tīkla mezgliem un aizsargātu mezglus no fiziskiem bojājumiem, mezgli tika novietoti speciālajos

konteineros ar ierobežotu piekļuvi (4.1 att). Var uzskatīt, ka visas mezgla darbības tehniskās īpašības un darbības frekvence ir konstanta vērtība trīs gadu laikā.



4.1.att. Ūdens piegādes kontroles mezgls

BST dzīves ilguma etalona vērtības noteikšana

Otrajā eksperimentā BST tīklu var uzskatīt par strādājošu tik ilgi, kamēr vismaz viens no termināla mezgliem ir aktīvs. Par etalona vērtību uzskatīsim laiku t_{st} , kas norāda, cik termināla mezgls var darboties, pārraidot informāciju un uzturot NC vārstu atvērtā stāvoklī, elektrības atslēgšanas gadījumā, izmantojot pirmajā gadā rūpnieciski definēto darbības frekvenci un tīkla topoloģiju.

Ieviesīsim tīkla darbības efektivitātes koeficientu δ_w , kas norāda uz tīkla dzīves ilguma pieaugumu procentos:

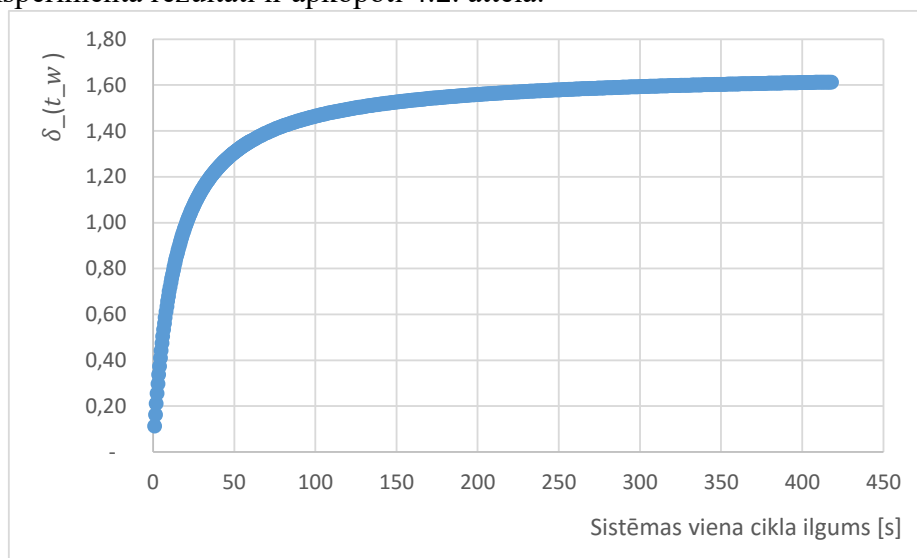
$$\delta_w = \left(\frac{t}{t_{st}} - 1 \right) * 100\%, \quad (4.4)$$

kur t – tīkla dzīves ilgums apskatāmajā posmā.

Ieviesīsim sistēmas kopējā darbības laikā un BST dzīves ilguma atkarības koeficientu δ_{t_w} procentos, kas norādīs uz sistēmas dzīves ilguma atkarību no kopējā viena darbības cikla laikā - t_c .

$$\delta_{t_w} = \left(\frac{t'_c}{t'} \right) * 100\%, \quad (4.5)$$

kur t'_c – kopējais viena cikla modelētās sistēmas laiks, t' - modelētās sistēmas kopējais dzīves ilgums. Eksperimenta rezultāti ir apkopoti 4.2. attēlā.



4.2. att. BST dzīves ilguma atkarība procentos no kopējā viena darbības cikla laikā

Eksperimenta rezultātu apkopojums

1. Kā var redzēt 4.2. attēlā, eksistē noteikta maksimālā robeža $\sup(t'_c)$, virs kuras palielināt t'_c vērtību nav lietderīgi.
2. Izmantojot eksperimentā gūto informāciju, var secināt, ka sistēmas kopējo dzīves ilgumu būtiski ietekmē mezgla uzdevumi, kas ir izpildīti, mezglam atrodoties gulēšanas režīmā. Gadījumā, ja mezgls ir aprīkots ar Ankor moduļiem ārējo objektu vadīšanai, enerģija, kas ir patērēta, sistēmai atrodoties gaidīšanas režīmā, palielinās, tāpēc samazinās kopējais sistēmas dzīves ilgums, un promocijas darbā piedāvātās metodes būtiski nepalielina BST dzīves ilgumu.
3. Izmantojot tīkla topoloģijas maiņu, visos gadījumos ir redzams reālais tīkla dzīves ilguma pieaugums ar vienādu mezgla tehnisko konfigurāciju. Apskatītajā piemērā BST dzīves ilguma pieaugums ir robežās no 1,5% līdz 6% atkarībā no izvēlēta mezgla darbības cikla. Kā jau tika minēts iepriekš, neliels BST dzīves ilguma pieaugums ir saistīts ar to, ka apskatāmā sistēma izmanto lielu jaudu, atrodoties gulēšanas režīmā.

Bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu pielietojums tīklā ar dinamisko koordinatora mezglu

Trešā eksperimenta laikā tika izmantots projekta UNITE izstrādātais bezvadu sensoru tīkls projektā izglītojamo noslodzes monitoringam skolās. Apskatāmais BST atšķiras no citiem ar to, ka tīkla elementi, apmainoties ar informāciju tīklā, izmanto ģenerēto datu plūsmas ceļa veidošanas algoritmu, jo nav iespējams paredzēt katra tīkla elementa atrašanās vietu tīklā, tāpēc var pielietot bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metodes, apskatot tīkla topoloģijas veidošanu no enerģijas patēriņa viedokļa. Sistēmā, kurā veikts eksperiments, ir 2 koordinatora mezgli un 120 mezgli, kas atkarībā no situācijas var pildīt gan termināla, gan koordinatora funkcijas. Sadarbībā ar Rīgas Valsts 3. ģimnāziju projekta UNITE ietvaros eksperimentu laikā tika izmantots sensoru modulis, kas darbojās saskaņā ar izstrādāto BST mezglu prototipu.

Trešā eksperimenta mērķis

Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt tīkla autonomas darbības palielināšanas iespēju, izmantojot promocijas darbā piedāvātās bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metodes.

Apskatāmais objekts

Apskatāmais objekts – UNITE projekta laikā izveidots bezvadu sensoru tīkla prototips, kas izmantoja ASUS P527 Windows Mobile iekārtu informācijas kontrolei un sensoru moduļu vadīšanai. Katrs tīkla mezgls darbojas, izmantojot ASUS P527 autonoma barošanas avota Li-Ion 1300mAh akumulatoru, kam rūpnieciski noteikts nemodificētas iekārtas darbības laiks, nepārtraukti izmantojot 3G tīklu, ir 6 stundas. Tīkla topoloģija ir definēta manuāli un ir pastāvīga visam tīkla darbības laikam.

Eksperimenta laiks

Eksperiments tika veikts divu gadu garumā un sadalīts divos posmos:

- Pirmais posms – 2006. gada jūnijs – 2007. gada marts. Sistēmas projektēšana, prototipa veidošana un prototipa aprobācija Rīgas Valsts 3. ģimnāzijā.
- Otrais posms – 2007. gada septembris – 2007. gada decembris. Izstrādātā prototipa aprobācija mācību procesā, izmantojot 72 izglītojamus, 31 skolēnu no Latvijas un 41 skolēnu no Lielbritānijas. Otrā posmā laikā tika aprobēta dinamiskā koordinatoru izmantošanas metode BST dzīves ilguma palielināšanai.

Eksperimenta ieejas dati

Eksperiments notika, izmantojot vienu sistēmu divu gadu laikā. Tehniskās BST īpašības eksperimentu laikā netika mainītas, sistēma darbojās, izmantojot eksperimentu sākumā definēto determinēto darbības struktūru un algoritmu. Var uzskatīt, ka mezglu izmantotā jauda katrā darbības stāvoklī un laiks, kurā sistēma atrodas katrā stāvoklī, ir konstanta vērtība.

Eksperiments notika vienā vietā, visiem termināla mezgliem tika definēta identiska sākotnējā konfigurācija un tīkla topoloģija. Eksperimenta laikā svarīgākais parametrs, kas ietekmēja katra mezgla patērēto enerģiju, ir sistēmas darbības rādiuss – R , tāpēc ir pieņemts, ka visi mezgli darbojas, maksimāli izmantojot tehniski definēto raidītāja jaudu informācijas pārsūtīšanai uz maksimālo distanci, kas nosaka, ka rādiusa vērtību var uzskatīt par konstantu.

BST dzīves ilguma etalona vērtības noteikšana

Trešajā eksperimentā BST tīklu var uzskatīt par strādājošu tik ilgi, kamēr vismaz 60% no visa tīkla mezgliem ir aktīvi. Tas ir pamatots ar projekta specifikāciju – stundu var uzskatīt par notikušu, ja tajā piedalās vismaz 60% skolēnu. Par etalona vērtību uzskatīsim pirmā gada etalonmodeļa eksperimentu laikā iegūto maksimālo sistēmas dzīves ilgumu t_{st} , kas norāda, cik ilgi termināla mezgls var darboties, pārraidot informāciju un izmantojot viena veida topoloģiju visa dzīves cikla laikā.

Ieviesīsim tīkla darbības efektivitātes koeficientu δ_w , kas norāda uz tīkla dzīves ilguma pieaugumu procentos:

$$\delta_w = \left(\frac{t}{t_{st}} - 1 \right) * 100\%, \quad (4.6)$$

kur t – tīkla dzīves ilgums apskatāmajā posmā. Tabulā 4.4. parādīti eksperimentu laikā gūtie rezultāti.

4.4. tabula

BST dzīves ilguma atkarība no tīkla darbības metodēm

Mezglu skaits	Sistēmas dzīves ilgums ar nemainīgo topoloģiju un vienu koordinātoru	RANDOM metodes izmantošana mezglā	Modelētā MREML metode
10	4	2,78	3,3584
20	4,5	4,2111	4,01175
30	4,8	4,7784	4,74144
40	5	5,4225	5,35
50	5,2	6,03096	6,03824
60	5,5	6,9432	7,05925
72	5,7	7,88025	8,06664

Eksperimenta rezultātu apkopojums

1. Kā var redzēt 4.4. attēlā, izmantojot maza izmēra tīklus, kur mezglu skaits $m < 40$, pastāv risks, ka pielietotā metode varēs izraisīt dzīves ilguma samazināšanu - koordinātorā atrašanās vietas dēļ tiks izveidota neefektīva tīkla topoloģija.
2. Izmantojot eksperimentā iegūto informāciju, var secināt, ka pārkonfigurēšanas metožu rezultāti ir atkarīgi no mezglu skaita tīklā un mezglu tehniskās specifikācijas. Katrā apskatāmā situācijā eksistē minimālais mezglu skaits, kas nosaka promocijas darbā aprakstītās metodes pielietojuma nepieciešamību.

Fizisko eksperimentu laikā iegūto rezultātu apkopojums

Eksperimenta laikā iegūtie rezultāti apstiprināja:

- Izmantojot tīkla topoloģijas maiņu, redzams tīkla dzīves ilguma pieaugums attiecībā pret tehniski definētajiem mezgla parametriem, bet pastāv gadījumi, kad tīkls izmanto vienīgo pieejamo maršrutēšanas ceļu, tad tīkla topoloģijas maiņas gadījumā ir patērēta liekā enerģija.
- BST dzīves ilgums ir atkarīgs no procesiem, kas ir aktivizēti mezglā, tam atrodoties gulēšanas režīmā. Mezglos, kas izmantoja Ancor moduļus, bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metode parādīja negatīvu rezultātu, jo palielinājās mezgla patērētā enerģija.
- Mezglos ar dinamisko konfigurāciju bija noteikta maksimālā robeža $\sup(t'_c)$, virs kuras nav lietderīgi palielināt kopējo viena cikla darbības laiku.
- Noteikts minimālais mezglu skaits tīklā, kad bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu pielietojums nav efektīvs.

Eksperimenta laikā iegūtie rezultāti ir teorētiski un atkarīgi no modeļa tehniskajām īpašībām. Tās norāda uz diviem trūkumiem:

- Eksperiments pierādīja, ka ražotāja norādītās mezgla tehniskās īpašības ir aptuvenas, un to nav iespējams izmantot etalona modeļa datiem.
- Laika trūkuma dēļ nav iespējams veikt pilnu eksperimentu ilgāka laikā posmā, tāpēc fiziskā eksperimenta laikā iegūtie dati apraksta situāciju aplūkotajā laika intervālā, ko nevar izmantot pilnai bezvadu sensoru tīkla dzīves cikla analīzei.

Eksperimenta laikā iegūtie rezultāti pierādīja nepieciešamību izmantot imitācijas modelēšanu, lai iegūtu precīzu metožu aprobāciju ilgākā laika intervālā, apskatot bezvadu sensoru tīkla pilnu dzīves ciklu.

Bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu imitācijas modelēšana

Nepieciešamība veikt bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas iespējas imitācijas modelēšanu ir pamatota ar vairākiem faktoriem:

- Neiespējamība veikt fizisko eksperimentu, izmantojot esošās tehnoloģijas.
- Ir nepieciešams veikt eksperimentu lielākā laika intervālā, lai tīklā radītu lielu atlikušās enerģijas E_0^n disbalansu. Tas dos iespēju, ka sistēma varēs veikt nepieciešamās tīkla topoloģijas izmaiņas enerģijas balansēšanai, pielietojot 3. nodaļā aprakstītās metodes.

Bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu eksperimentālā aprobācija, izmantojot modelēšanas rīku

Bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu eksperimentālai aprobācijai promocijas darbā ir realizētas šādas darbības:

- Bezvadu sensoru tīkla imitācijas modelēšanas programmatūrā ir izveidota tīkla topoloģija un izdalītas tīkla konstantās vērtības.
- Eksperimentāli noteikta bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma etalona vērtība.
- Eksperimentāli pārbaudīta tīkla komponentu izvietošanas ietekme uz tīkla kopējo darbību.
- Eksperimentāli pārbaudīta raidītāja jaudas izmantošanas ietekme uz tīkla kopējo dzīves ilgumu.
- Eksperimentāli pārbaudīta mezgla atsevišķo darbības režīmu ietekme uz tīkla kopējo dzīves ilgumu.
- Eksperimentāli veikta promocijas darbā piedāvāto bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu efektivitātes salīdzinājums.

Imitācijas modelēšanas laikā izmantotās sistēmas ieejas dati

Veicot imitācijas modelēšanu, tiks izmantoti apgalvojumi:

- Tīkla darbības zona ir $L \times L$, kur $L=100\text{m}$;
- Tīkla mezglu koordinātes x, y nosaka gadījuma skaitļu ģenerators intervālā no 0 līdz L ;
- Tīkla pārraidītās informācijas pakešu lielums ir vienāds ar 100 baitiem;
- Ģenerētu datu plūsma $\lambda = 0,2 \text{ freimi/sekundē}$;
- Koordinatora atrašanās vietu nosaka imitācijas scenārijs.

Modelēšanas procesam bezvadu sensoru tīkla topoloģijas uzbūve

Tīkla topoloģijas maiņu veicina tīkla mezgla vadības modulis (3. nodaļa). Visi mezgli, kas atrodas R vai mazākā attālumā no koordinatora, izmanto taisno savienojumu ar koordinatora mezglu. Citiem mezgliem maršrutētājs ir izvēlēts, izmantojot sekojošus kritērijus:

1. Maršrutētāju skaits ceļā līdz koordinatoram.
2. Maršrutētāju noslodze (pieslēgto mezglu skaits).
3. Attāluma koeficients.
4. Atlikusī enerģija retranslācijas mezglos.

Tehniskie sistēmas parametri (dažādos režīmos izmantotā jauda) ir paņemti no projekta ASDK Technology izstrādātās ierīces, kas izmanto tirgū plaši pieejamo retranslators moduli [MEM 2015]. Visi modelēšanas procesā izmantotie konstantas vērtības dati ir attēloti 4.5. tabulā.

4.5. tabula

Modelēšanas procesā izmantotās konstantas vērtības

Tehniskais parametrs (apzīmējums)	Vērtība
Tīkla lielums metros L	100
Mezglu skaits tīklā n	100
Mezglu sākuma enerģija E_0	20
Grafiku pārraides blīvums katrā no tīkla mezgliem λ	0,2
Pārraidītais grafiku lielums L_{freim}	100

Tīkla dzīves ilguma etalona vērtības noteikšana, izmantojot modelēšanas rīku

Katrs tīkla darbības cikls ir unikāls. Atkarībā no izveidotās situācijas tīklā, ir veidota jauna tīkla topoloģija. Modelējot kopējo BST dzīves ilgumu, tīkla stāvokļus var sadalīt kategorijās m , kad tīkls atrodas vienā stāvoklī un izmanto nemainīgo topoloģiju.

Katrā tīklā eksistē efektīvākā koordinators atrašanās vieta, kad izveidotās tīkla topoloģijas darbības rezultātā ir nodrošināts lielāks tīkla autonomas darbības laiks:

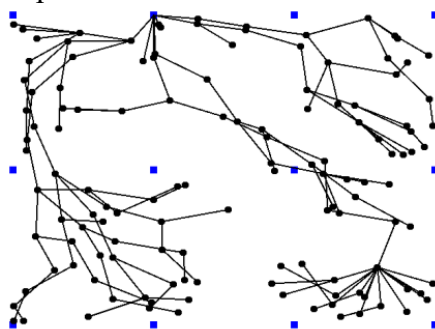
$$k_{st} = \arg \max_{k \in [1..m]} \min_{i \in [1..n]} \frac{E_i}{p_k^i}. \quad (4.7)$$

Tīkla darbības laiku ar nemainīgo tīkla topoloģiju var aprakstīt, izmantojot formulu:

$$t_{st} = \max_{k \in [1..m]} \min_{i \in [1..n]} \frac{E_i}{p_k^i}. \quad (4.8)$$

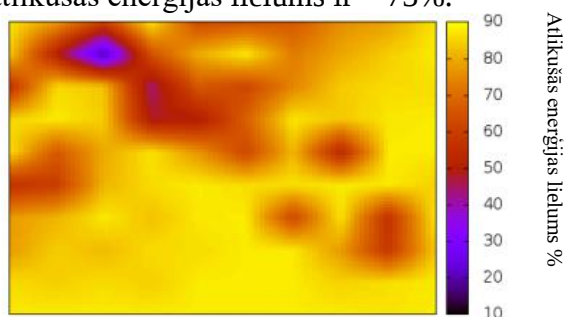
Modelējot tīkla darbību ar nemainīgo koordinators atrašanās vietu un pastāvīgo tīkla topoloģiju, var redzēt, ka tīklā parādās atlikušās enerģijas nelīdzsvarotība mezglos. 4.3.attēlā ir attēlota izveidotā tīkla topoloģija ar ģenerētajiem tīkla mezgliem efektīvākai koordinators atrašanās vietas noteikšanai. 4.4. attēlā ir parādīts atlikušās enerģijas lielums modelētas

situācijas laikā. Mezgliem, kas atrodas koordinātoru tuvumā, ir krietni lielāks enerģijas patēriņš, nekā mezglos, kas atrodas tālākajos punktos.



4.3.att. Modelēšanas procesā izveidota tīkla topoloģija

Modelējot situāciju ar nemainīgo tīkla topoloģiju, var secināt, ka, apstājoties vienam tīkla mezglam, kopējais tīkla atlikušās enerģijas lielums ir $\sim 73\%$.



4.4. att. Atlikušās enerģijas lielums modelēšanas procesā

Veicot turpmāko tīkla modelēšanu, tīkla nemainīgas topoloģijas gadījumu uzskatīsim kā sākumpunktu, attiecībā, pret kuru tiks veikts turpmākais iegūto rezultātu salīdzinājums. Tas ir pamatots ar to, ka tīkla dzīves ilgumu nav iespējams tehniski definēt, jo tas ir atkarīgs no daudziem faktoriem [2. nodaļa]. Piemēram, palielinot akumulatora kapacitāti vienā no tīkla mezgliem, tiks palielināts atlikušās enerģijas E_0 lielums tīklā.

Izmantosim tīkla darbības efektivitātes koeficientu, kas norāda uz tīkla dzīves ilguma pieaugumu procentos:

$$\delta_t = \left(\frac{t}{t_{st}} - 1 \right) * 100\%, \quad (4.9)$$

kur t_{st} – tīkla dzīves ilgums ar nemainīgo tīkla topoloģiju,

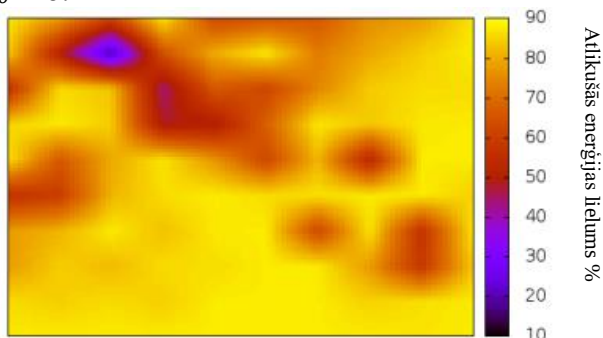
t – tīkla dzīves ilgums ar aktīvo vadības moduli topoloģijas tīkla maiņai.

Bezvadu sensoru tīkla komponentu izvietošanas ietekme uz tīkla dzīves ilgumu

Kā jau iepriekš tika minēts, tīkla dzīves ilgums ir atkarīgs no vairākiem faktoriem. Apskatīsim, kā tīkla dzīves ilgumu ietekmē mezglu atrašanās pozīcijas tīklā. Pieņemsim, ka mezglu skaits tīklā $n=100$, retranslatoru darbības rādiuss – 50m. Modelēšanas laikā var redzēt lielu saņemto rezultātu starpību, dažās situācijās svārstības veido līdz 36%.

Neskatoties uz to, ka tīkla topoloģijas maiņa ļauj palielināt tīkla dzīves ilgumu līdz 20%, eksistē situācijas, kad tīkla struktūras maiņa dod pretēju efektu, attiecīgi samazinot dzīves ilgumu. Tas ir pamatots ar to, ka ģenerējot plūsmas maršrutu tīklā, katru reizi mainās retranslācijas mezglu noslodze. Apskatot tīkla maršruta struktūru, var redzēt, ka tuvāk koordinātorā mezglam eksistē daži ķēdes posmi, kas retranslē lielāko informācijas lielumu (4.3.att.).

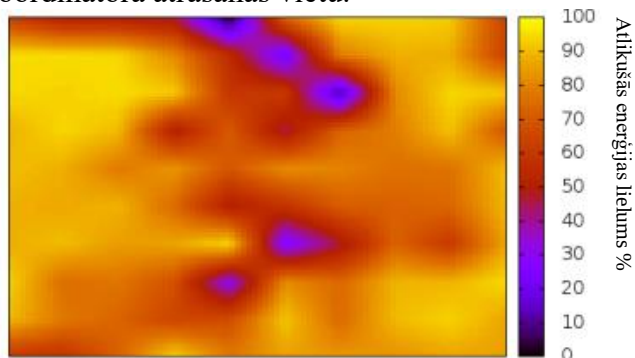
Eksperimentāli apskatīsim, kā mainās kanālu noslodze sistēmas aktīvākajos mezglos. Veicot eksperimentu, samazināsim mezglu skaitu tīklā - $n=50$, tas vairāk ļaus noslogot mezglus un ieraudzīt reālo rezultātu. Pieņemsim, ka sākuma enerģija $E_0=20$, sistēma veic 10 iterācijas. Lai konstatētu reālo tīkla segmentu noslodzi, tīkla topoloģiju mainīsim manuāli, atjaunojot sākuma enerģijas vērtību - $E_0=20$.



4.5. att. Enerģijas sadalījums mezglos pēc 10 iterācijām

4.5. attēlā var redzēt, ka mainot tīkla topoloģiju, eksistē vietas, kur enerģijas patēriņš mezglos saglabājas augstākajā līmenī. Enerģijas patēriņa svārstības ir tikai 8% robežās. Tas pierāda, ka izstrādātā metodes efektivitāte ir atkarīga no koordinatora atrašanās vietas.

Eksperimentāli pārbaudīsim, kā koordinatora atrašanās vietas maiņa ietekmē tīkla mezglu noslodzi. Veicot eksperimentu, mezglu skaits tīklā - $n=50$, sākuma enerģija $E_0=20$, sistēma veic 10 iterācijas. Lai ieraudzītu reālo tīkla segmentu noslodzi, tīkla topoloģiju mainīsim manuāli, mainot koordinatora atrašanās vietu.



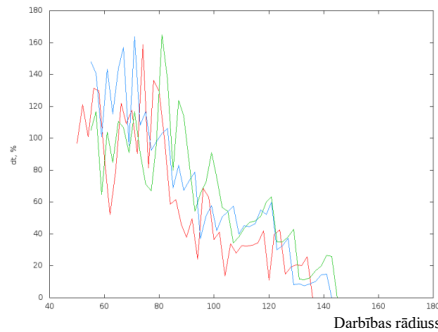
4.6. att. Atlikušās enerģijas lielums ar mainīgo koordinatora mezglu

Attēlā 4.6. var redzēt, ka mainot koordinatora atrašanās vietu tīklā, enerģijas patēriņš tīkla mezglos ir daļējā disbalansā. Modelēšanas laikā var redzēt, ka, mainoties koordinatora atrašanās vietai, mainās segmenti, kuros notiek liela datu pārraide. Mainot koordinatora atrašanās vietu, tīkla dzīves ilguma pieaugums sastāda 27% attiecībā pret nemainīgo tīkla topoloģiju.

Tīkla mezglu izvietojuma modelēšana ļauj noskaidrot BST pārkonfigurēšanas pielietotās metodes lietderību un noteikt tīkla sākotnējo tehnisko parametru pielāgošanu tīkla darbības shēmai.

BST mezgla retranlatoru darbības rādiusa ietekme uz tīkla dzīves ilgumu

Apskatīsim trīs tīkla scenārijus ar ģenerēto tīkla mezglu atrašanās vietu. Modelēšanas laikā var redzēt, kādu ietekmi atstāj pārraides attāluma koeficients uz tīkla darbības koeficientu δ_t . Palielinot distanci, ir vietas, kad darbības koeficienta vērtība pieaug attiecībā pret iepriekšējo vērtību. Modelēšanas rezultāti ir attēloti 4.7 attēlā.



4.7. att. Pārraidītā attāluma koeficienta ietekme uz δ_t .

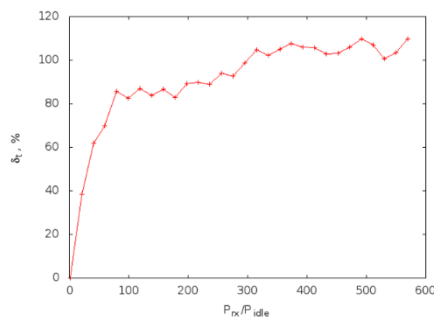
Izmantojot iegūto modelēšanas rezultātu, var izdalīt trīs būtiskas īpašības:

- Darbojoties tīklam, katram tīkla mezglam eksistē darbības rādiuss, kad enerģijas patēriņš ir efektīvāks;
- Pastāv situācijas, kad ir efektīvāk palielināt darbības rādiusu informācijas pārraidei uz tālāku distanci, atsakoties no maršrutēšanas funkcijām;
- Enerģijas balansēšanas metodes jāpielieto kopā ar maršrutēšanas protokoliem, kas ļauj modificēt raidītāja darbības jaudu.

Izmantojot lielo rādiusa darbības koeficientu R , var rasties situācija, kad tīkls darbosies, izmantojot zvaigznes topoloģiju - sensoru mezgli būs pieslēgti koordinatora mezglam bez maršrutēšanas protokoliem. Šādā situācijā vienīgais tīkla dzīves ilguma palielināšanas veids ir akumulatora jaudas palielināšana vai alternatīvas enerģijas izmantošana mezglos.

Tīkla mezgla atsevišķo darbības režīmu ietekme uz tīkla kopējo BST dzīves ilgumu

Promocijas darba 2. nodaļā ir detalizēti aprakstītas bezvadu sensoru tīkla mezglu izmantotās jaudas aprēķina metodes. Matemātiski tika pierādīts, ka kopējā mezglu patērētā enerģija vienā darbības ciklā Δt ir atkarīga no laika, ko katrs tīkla mezgls pavada gulēšanas režīmā. Apskatīsim mezglu izmantotās jaudas $\frac{P_{rx}}{P_{idle}}$ attiecību, modelējot tīkla darbību, kas sastāv no 200 mezgliem.



4.8. att. Mezglu izmantotās jaudas $\frac{P_{rx}}{P_{idle}}$ attiecība

Modelēšanas rezultāts (4.8. attēls) norāda uz ļoti svarīgu atkarību, kas nosaka metožu pielietošanas robežas. Gadījumā, kad darbības efektivitātes δ_t un jaudas attiecība līdzinās 1, metožu pielietošana neietekmēs kopējo sistēmas dzīves ilgumu. Tas ir pamatots ar to, ka tīklā neeksistē liela patērētās enerģijas starpība, tāpēc ka izmantotā jauda nav atkarīga no datu plūsmas, ko pārraida mezgls. Palielinoties attiecībai, funkcijas vērtība strauji pieaug. Pieauguma tendences ātruma samazināšanās liecina par to, ka sistēmai ir nepieciešama noteikt minimālās enerģijas daudzumu uzdevumu pildīšanai. Pamatojoties uz modelēšanas datiem, var

secināt, ka enerģijas pārkonfigurēšanas metodi lietderīgi ir izmantot tad, kad mezglu izmantotā jauda gaidīšanas režīmā P_{idle} ir vismaz 10 reizes mazāka nekā ar ieslēgtu raidītāju P_{rx} .

Promocijas darbā piedāvāto bezvadu sensoru tīkla dzīves pārkonfigurēšanas metožu efektivitātes noteikšana dažāda lieluma tīklos

Tabulā 4.6. ir parādīta koeficienta δ_t atkarība no modelētā tīkla lieluma. No eksperimentā iegūtajiem datiem, var secināt, ka, izmantojot piedāvāto pārkonfigurēšanas metodi, ir redzams koeficienta δ_t pieaugums atkarībā no tīkla lieluma. Tas ir pamatots ar to, ka, palielinot mezglu skaitu tīklā, ir palielināta starpība starp mezglu patērēto enerģiju. Pielietojot tīkla pārkonfigurēšanas metodi, var palielināt kopējo tīkla dzīves ilgumu ar lielāko enerģijas starpību starp mezgliem.

4.6. tabula

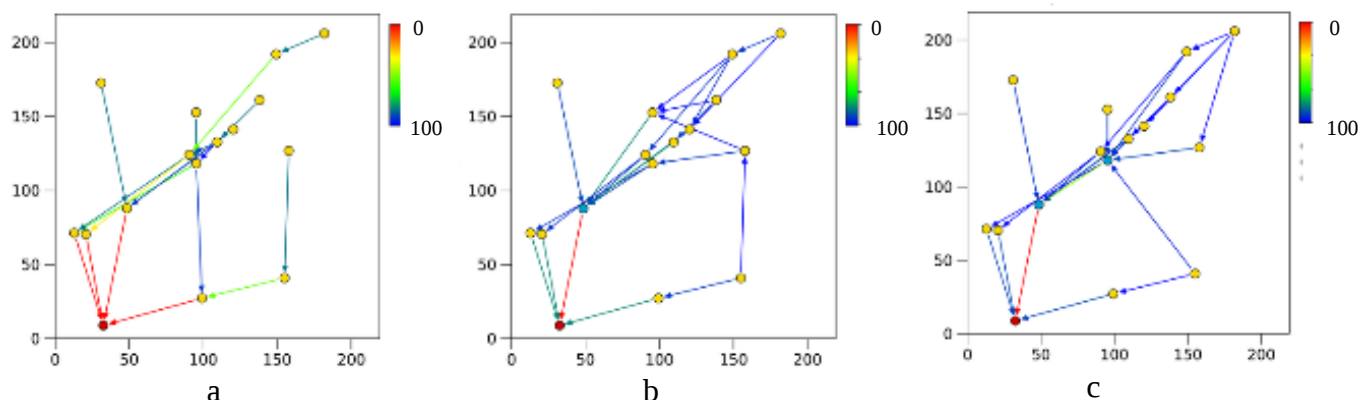
Koeficienta δ_t atkarība no modelētā tīkla lieluma, izmantojot dažādas heuristiskās metodes

Mezglu skaits	MRE	RANDOM	MREML
10	20.1408	-30.5998	-16.0439
30	43.5082	-5.4268	-11.4561
50	62.6674	-0.4599	1.4793
70	88.7197	15.4599	23.4793
90	112.335	31.9885	40.2624
110	115.114	46.2421	54.7148
130	122.283	42.2984	62.8865

Izmantojot maza izmēra tīklus, kuros mezglu skaits $m < 50$, pastāv risks, ka pielietotās tīkla pārkonfigurēšanas metodes varēs izraisīt dzīves ilguma samazināšanu - koordinatora atrašanās vietas dēļ tiks izveidota neefektīva tīkla topoloģija.

Tīkla darbības heuristisko metožu imitācijas modelēšana

4.9. attēlā parādīta atlikusī enerģija trīs tīkla darbības veidos – statistiskā darbība ar nemainīgo koordinatora atrašanās vietu (4.9.att. a), gadījuma darbība, kad tīkla topoloģija ir veidota, izmantojot *Deikstra* algoritmu bez enerģijas uzskaites (4.9.att. b), un promocijas darbā piedāvātās metodes algoritms (4.9.att. c). ir modelēts tīkls ar mezgla skaitu $m=150$.



4.9.att. Atlikusās enerģijas sadalījums tīkla mezglos.

Izmantojot statistisko koordinatora atrašanās vietu, tīklā eksistē vietas, kur mezgli gandrīz neizmanto savu enerģiju, un, tīklam pārstājot darboties, atlikusī enerģija mezglos sastāda 90% no sākotnējā enerģijas lieluma. Izmantojot jauno tīkla maršrutu ģenerēšanu katrā pārraides cikla laikā (RANDOM), ir redzams patērētās enerģijas līdzsvars tīklā. Izmantojot

promocijas darbā piedāvāto dinamiskā koordinatora mezgla vadības metodi, var redzēt, ka patērētā enerģija atrodas disbalansā, izņemot vietas, kas fiziski atrodas attālinātajos punktos un visā tīkla darbības laikā pilda tikai sensoru funkcijas.

Imitācijas modelēšanas laikā iegūto rezultātu apkopojums

Izmantojot imitācijas modelēšanas rīku, promocijas darbā tika iegūti šādi rezultāti:

- Izmantojot dinamisko koordinatora mezglu, dzīves ilguma pieaugums sastāda 27% attiecībā pret etalona modeļa vērtību ar nemainīgo tīkla topoloģiju.
- Izmantojot lielu darbības rādiusa koeficientu R , var rasties situācija, kad tīkls darbosies, izmantojot zvaigznes topoloģiju, tā rezultātā samazināsies kopējais tīkla dzīves ilgums.
- Eksistē minimāla gaidīšanas režīma P_{idle} robeža, kas nosaka tīkla pārkonfigurēšanas metodes izmantošanas efektivitāti. Izmantojot imitācijas modelēšanas rīku, ir noteikts pārkonfigurēšanas metožu izmantošanas nosacījums: $P_{idle} < P_{rx} \cdot 10$.
- Izmantojot maza izmēra tīklus, kur mezglu skaits $m < 50$, promocijas darbā piedāvātās tīkla pārkonfigurēšanas metodes samazina kopējo tīkla dzīves ilgumu, nelietderīgi patērējot enerģiju tīkla topoloģijas maiņai.

DARBA KOPĒJIE REZULTĀTI, SECINĀJUMI UN TURPMĀKIE PĒTĪJUMI

Promocijas darba mērķis bija izstrādāt un izpētīt bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modeli un metodes, kas ļaus palielināt kopējo bezvadu sensoru tīkla dzīves ilgumu un līdzsvarot atlikušo enerģiju tīkla mezglos. Mērķa sasniegšanai tika veikti šādi uzdevumi:

- Izanalizētas esošās bezvadu tīkla dzīves ilguma palielināšanas metodes.
- Noteikti tīkla mezglu faktori, kas ietekmē kopējo sistēmas dzīves ilgumu.
- Izstrādāts sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modelis.
- Izstrādātas bezvadu sensoru tīkla darbības palielināšanas metodes enerģijas balansēšanai tīkla mezglos.
- Veikta izstrādāto modeļa un tīkla pārkonfigurēšanas metožu eksperimentāla aprobācija reālajās bezvadu sensoru tīklu sistēmās.
- Veikta izstrādāto tīkla pārkonfigurēšanas metožu validācija, izmantojot imitācijas modelēšanas rīku.

Veicot literatūras analīzi, izmantojot dažādas bezvadu sensoru tīkla topoloģijas un veidus, tika secināts:

- Bezvadu sensoru tīkli ir perspektīva tehnoloģija, kas ir pielietota gan sabiedriskajā, gan privātajā sektorā. Lielais zinātnisko darbu klāsts, kas ir saistīts ar BST pētījumiem, kā arī promocijas darbā aprakstītās problēmas, norāda uz šīs tēmas aktualitāti.
- Pēdējo gadu zinātnisko darbu pārskats un analīze norāda, ka primārais pētījuma objekts bezvadu sensoru tīklos nemainīgi paliek sistēmas dzīves ilguma palielinājums. Pēdējā laikā ir noteiktas vairākas BST dzīves ilguma definīcijas un palielinājuma metodes [KYP 2011]. Piedāvātais promocijas darbā dzīves ilguma novērtēšanas modelis nosaka būtiskas tīkla īpašības, kas ietekmē tīkla dzīves ilgumu: mezgla darbības diapazons, mezgla pārkonfigurēšanas iespējas, enerģijas balansēšana.

Promocijas darba ietvaros izstrādāts tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modelis un pārkonfigurēšanas metodes tīkla dzīves ilguma palielināšanai. Piedāvātais modelis un metodes

tika eksperimentāli aprobētas, lai varētu pārbaudīt izvirzītās hipotēzes. Eksperimentu rezultāti parādīja:

- Izstrādātais bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modelis ļauj noteikt katra atsevišķa tīkla elementa dzīves ilgumu, izmantojot BST mezglu primārās darbības veidus. Tas ļauj novērtēt kopējo tīkla dzīves ilgumu, ņemot vērā tīkla pārkonfigurēšanas iespējas. Par svarīgāko piedāvātā modeļa atšķirību no agrāk izstrādātajiem var minēt tā plašo pielietojumu un adaptāciju pētāmā tīkla īpašībām: tīkla topoloģijai, bezvadu standartiem, moduļa tehniskajām īpašībām, darbības frekvencei, topoloģijas maiņai.
- Gadījumos, kad tīkla parametri ar laiku ir mainīti, ir piedāvāts izmantot dinamisko koordinatora mezgla vadības metodi, aktivizējot autonomo tīkla mezgla vadības moduli. Pamatojoties uz veikto analīzi, virtuālā koordinatora vadības metodē ir izmantots promocijas darbā piedāvātais heuristiskais algoritms MREML, kas salīdzinājumā ar esošajiem algoritmiem būtiski palielina kopējo BST dzīves ilgumu.
- Veicot imitācijas modelēšanu, izmantojot promocijas darbā izstrādāto modelēšanas rīku, deva iespēju novērtēt apskatāmo metožu un algoritmu efektivitāti, kā arī noteikt tīkla konfigurācijas prasības, kas jāievēro BST modelēšanas laikā. Piedāvātais rīks ļauj modelēt pēc iespējas ilgāku tīkla autonomo darbību un veido nepieciešamās tehniskās prasības modelējamajam tīklam.
- Tiek izstrādāta bezvadu sensoru moduļa datu plūsmas vadības metode, kas, izmantojot promocijas darbā aprakstīto algoritmu, veido tīkla darbības topoloģiju, līdzsvarojot patērēto enerģiju tīklā. Promocijas darbā piedāvātā algoritma divas būtiskas priekšrocības - iespēja to integrēt termināla mezglā, kuram ir ierobežoti tehniskie resursi un enerģija, un par ceļa veidošanas primāro parametru ir uzskatīts vidējais alkušās enerģijas lielums tīklā.
- Izmantojot promocijas darbā iegūtos rezultātus un ievērojot piedāvātās prasības tīkla topoloģijas veidošanai, ir iespēja sasniegt BST dzīves ilguma pieaugumu vidēji līdz 23%, maksimālais pieaugums imitācijas modelēšanas laikā bija 32%.

Promocijas darbā ir apstiprinātas izvirzītās hipotēzes:

Hipotēze: Dinamiskā koordinatora izmantošana līdzsvaro atlikušo enerģiju mezglos un palielina kopējo bezvadu sensoru tīkla dzīves ilgumu.

Pierādījums: Eksperimentu rezultāti parādīja, ka, izmantojot statisko koordinatora atrašanās vietu tīklā, eksistē vietas, kurās mezgli gandrīz neizmanto savu enerģiju, un, tīklam pārstājot darboties, atlikušās enerģijas lielums mezglos veido 90% no sākotnējās enerģijas lieluma. Izmantojot dinamisko koordinatora vadības metodi, enerģijas patēriņš tīklā atrodas disbalansā.

Hipotēze: Atlikušās enerģijas balansēšanas metodes jāpielieto kopā ar maršrutēšanas protokoliem, kas ļauj dinamiski pielāgot katra tīkla mezgla raidītāja darbības jaudu.

Pierādījums: Eksperimentu rezultāti parādīja - izmantojot promocijas darbā piedāvāto tīkla mezgla datu plūsmas vadības metodi tīkla dzīves ilguma palielināšanai, var redzēt, ka patērētās enerģijas skaits atrodas disbalansā, izņemot vietas, kuras fiziski atrodas attālinātajos punktos un tīkla darbības laikā pilda tikai sensoru funkcijas.

Hipotēze: Tīkla pārkonfigurēšanas metodes ir lietderīgi pielietot tīklos ar lielu mezglu skaitu, kur mezglu gulēšanas laiks $t_{idle} \rightarrow \min$.

Pierādījums: Izmantojot maza izmēra tīklus, kur mezglu skaits $m < 50$, promocijas darbā piedāvātās tīkla pārkonfigurēšanas metodes samazina kopējo tīkla dzīves ilgumu, nelietderīgi patērējot enerģiju tīkla topoloģijas maiņai.

Eksistē minimālā gaidīšanas režīma P_{idle} robeža, kas nosaka tīkla pārkonfigurēšanas metodes izmantošanas efektivitāti. Izmantojot imitācijas modelēšanas rīku, ir noteikts pārkonfigurēšanas metožu izmantošanas nosacījums: $P_{idle} < P_{rx} \cdot 10$.

Promocijas darba sasniegtie zinātniskie rezultāti

- Ir izstrādāts bezvadu sensoru tīkla dzīves ilguma novērtēšanas modelis, kas ļauj noteikt tīkla atteikuma laiku, ieskaitot tīkla atjaunošanas spējas.
- Ir izstrādāta dinamisko koordinatora mezgla vadības metode, kas ļauj līdzsvarot enerģijas patēriņu tīklā.
- Ir izstrādāta bezvadu sensora moduļa datu plūsmas vadības metode, kas, izmantojot maršrutēšanas algoritmu, veido tīkla topoloģiju, līdzsvarojot patērēto enerģiju tīklā.
- Ir piedāvāta virtuālā koordinatora mezgla vadības metode tīkla topoloģijas maiņai, kas izmanto heuristisko MREML algoritmu tīkla dzīves ilguma palielināšanai.

Promocijas daba sasniegtie praktiskie rezultāti

- Izstrādāts eksperimentālais bezvadu sensoru tīkla sensora mezgla prototips, kas, dinamiski veicot pārkonfigurāciju, var darboties termināla un maršrutētāja režīmā.
- Tika veikti eksperimenti, ieviešot izstrādātās bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metodes divos starptautiskajos projektos, kā arī piesaistīts KPFI līdzfinansējums prototipa aprobācijai privātajā sektorā.
- Tika izstrādāts eksperimentālais programmatūras prototips bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metožu imitācijas modelēšanai. Pamatojoties uz imitācijas modelēšanas laikā iegūtajiem rezultātiem, tika izdalīti BST pārkonfigurēšanas metožu pielietojuma ierobežojumi un nosacījumi.

Promocijas darba praktiskā realizācija:

- Darbā aplūkoto problēmu risinājumi ir izmantoti ES 6. ietvara programmas projektā Unite, kas tika realizēts sadarbībā ar Rīgas Valsts 3. ģimnāziju laikā no 01.02.2006. līdz 01.07.2008. Projekta laikā tika izstrādāts izglītojamo noslodzes monitoringa rīks.
- Informācijas datu pārraides tīkla plānošanas metode tika aprobēta programmas ES 6. projekta eLogmar-M ietvaros. Projekta laikā tika izveidota tīklu ceļu veidošanas koncepcija pārvietojamo kravu uzraudzībai, izmantojot sensoru mezglus.
- Bezvadu sensoru tīkli tika izmantoti Baltijas jūras reģiona INTERREG programmas projekta BONITA ietvaros cilvēku plūsmas uzskaitēi un informācijas piegādei izstāžu zālē. Projekta laikā tika izveidots autonomais pārkonfigurējamais BST tīkla mezgls, kas vēlāk tika izmantots kā atsevišķs daudzfunkcionāls BST sensoru elementa prototips.
- Sadarbībā ar klimata pārmaiņu finanšu instrumentu 2012. gadā izstrādāts un ir izmantots autonomas, energoefektīvas “Gudras mājas” uzturēšanas un vadības bezvadu sensoru tīkls, kas ir integrēts 3 privātmājās Latvijā. Izstrādātais tehniskais risinājums palielināja mājas sensoru moduļu apkalpošanas intervālu no rūpnieciski definētiem 2 gadiem līdz 5 gadiem.

Darba rezultāti ir izmantoti divos RTU mācību priekšmetos:

- “Adaptīvas datu apstrādes sistēmas (DIP320)” mācību procesā,
- “Lietišķo datorsistēmu programmatūra (DIP392)” mācību procesā.

Promocijas darba turpmākie attīstības virzieni:

- Praksē integrēt bezvadu sensoru tīkla pārkonfigurēšanas metodes bezvadu mezglu sistēmas līmenī. Izmantojamo metožu integrācija ļaus atvieglot mezgla pamata darbības shēmas aprakstu un atslogot galveno mezgla procesoru.
- Praksē integrēt bezvadu sensoru tīkla imitācijas modelēšanas rīku tīkla topoloģijas plānošanas programmatūrās, kas ļaus tīkla plānošanas stadijā, izmantojot promocijas darbā piedāvātās metodes, analizēt projektējamā tīkla dzīves ilgumu.

BIBLIOGRĀFISKAIS SARAKSTS

- [AKL 2001] Akl, A. An investigation of self-organization in wireless sensor networks / A. Akl, T. Gayraud, and P. Berthou // IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). - 2001. - 1-6 pp.
- [ALG 2008] Algorithms and Protocols for Wireless, Mobile Ad Hoc Networks // Ed. by A. Boukerche. Wiley-IEEE Press, 2008.
- [ALN 2010] Alnabelsi S., Almasaeid H. M., Kamal A. Optimized sink mobility for energy and delay efficient data collection in FWSNs // Computers and Communications (ISCC), 2010 IEEE Symposium on. 2010. P. 32–37.
- [ALN 2011] AlNuaimi M., Sallabi F., Shuaib K. A survey of Wireless Multimedia Sensor Networks challenges and solutions // Innovations in Information Technology (IIT), 2011 International Conference on. 2011. P. 191–196.
- [ATH 2000] Athanasiadou G., Nix A., McGeehan J.. “A microcellular ray-tracing propagation model and evaluation of its narrow-band and wide-band predictions,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18, no. 3, pp. 322–335, Mar. 2000.
- [BAR 2004] Baruah P., Urgaonkar R., Krishnamachari B. Learning enforced time domain routing to mobile sinks in wireless sensor fields // Proceeding of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, LCN 2004. Tampa FL: 2004. P. 525–532.
- [BAS 2006] Basagni S., Carosi A., Melachrinoudis E. et al. Protocols and model for sink mobility in wireless sensor networks // SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev. 2006. Vol. 10, no. 4. P. 28–30.
- [BAS 2007] Basagni S., Carosi A., Petrioli C. Controlled Vs. Uncontrolled Mobility in Wireless Sensor Networks: Some Performance Insights // Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. 2007 IEEE 66th. 2007. P. 269–273.
- [BER 1994] Beran, J. Statistics For Long-Memory Processes / J. Beran. - London: Chapman and Hall, 1994.
- [BI 2007] Bi Y., Sun L., Ma J., Li N., Chen C., “HUMS: An Autonomous Moving Strategy for Mobile Sinks in Data-Gathering Sensor Networks,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007, Article ID: 164574.
- [BLO 2002] Blough D. M., Santi P. Investigating upper bounds on network lifetime extension for cell-based energy conservation techniques in stationary ad hoc networks // Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking. MobiCom '02. New York, NY, USA: ACM, 2002. P. 183–192.
- [BOL 2001] Bolcskei H., Nabar R. U., Erceg V., Gesbert D., “Performance of spatial multiplexing in the presence of polarization diversity,” in IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2001), Salt Lake City, UT, May 2001, vol. 3, pp. 644–647.
- [CAR 2004] Carson J. S. II, "Introduction to Modeling and Simulation," Winter Simulation Conference, December, 2004, pp. 1283-1289.
- [CAR 2006] Carbutar B., Grama A., Vitek J., Carbutar O. Redundancy and coverage detection in sensor networks // ACM Trans. Sen. Netw. 2006. Vol. 2, no. 1. P. 94–128.
- [CHA 2003] Chakrabarti A., Sabharwal A., Aazhang B. Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks // Proceedings of the Second International Workshop on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2003. Palo Alto CA: 2003. P. 129–145.
- [CHA 2003] Chatzigiannakis I., Nikolettas S., Spirakis P. An efficient communication strategy for ad-hoc mobile networks // Proceedings of the Twentieth Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing. Newport: 2003. P. 320–332.

- [CHE 2001] Chen B., Jamieson K., Balakrishnan H., Morris R. Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks // ACM Wireless Networks Journal. 2001. P. 85–96.
- [CHE 2004] Chen D., Varshney P. K. QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey // Proc. of the 2004 International Conference on Wireless Networks (ICWN 2004), Las Vegas, Nevada, USA. 2004. P. 227–233.
- [CHE 2006] Chen Y., Nasser N. Energy-balancing multipath routing protocol for wireless sensor networks // Proceedings of the 3rd international conference on Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks. QShine '06. New York, NY, USA: ACM, 2006.
- [CHE 2012] Chen Y., Zhao Q. On the lifetime of wireless sensor networks // Communications Letters, IEEE. Nov. Vol. 9, no. 11. P. 976–978.
- [COL 2007] Colesanti U. M., Crociani C., Vitaletti A. On the accuracy of omnet++ in the wireless sensornetworks domain: simulation vs. testbed // Proceedings of the 4th ACM workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks. PE-WASUN '07. New York, NY, USA: ACM, 2007. P. 25–31.
- [COL 2015] Collier, S.E. The Emerging Enernet: Convergence of the Smart Grid with the Internet of Things // Rural Electric Power Conference (REPC), 2015 IEEE, P. 65 - 68
- [DAR 2005] Dario I. A., Akyildiz I. F., Pompili D., Melodia T. Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges // Ad Hoc Networks. 2005. Vol. 3. P. 257–279.
- [ENE 2015] Energy Harvesting Wireless Technology [ONLINE] / EnOcean GmbH. 2012. URL: <http://www.enocean.com/en/energy-harvesting-wireless/> (Datums: 10.2012).
- [ERR 1990] Erramilli A., Singh R.P., Application of Deterministic Chaotic Maps to Characterise Broadband Traffic, 7th ITC Specialist seminar, Morristown, 1990
- [FIR 2015] FireFly Platform [ONLINE]. URL: <http://www.ece.cmu.edu/firefly/> (Datums: 05.2013).
- [FOK 2005] Fok C., Roman G., Lu C.. "Rapid Development and Flexible Deployment of Adaptive Wireless Sensor Network Applications," Proceedings of 25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems 2005, pp.653-662.
- [GED 1996] Gedney S. D.. "Anisotropic perfectly matched layer absorbing medium for the truncation of FDTD lattices," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, pp. 1630–1639, December 1996.
- [GEN 2015] Genita Gautam, Biswaray Sen. Design and Simulation of Wireless Sensor Network in NS2. // International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 113 – No. 16, March 2015
- [GEO 2006] Georgoulas D., Blow K., "Making Motes Intelligent: An Agent-Based Approach to Wireless Sensor Networks," The World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS) on Communications Journal 2006, pp 515-522
- [GOY 2009] Goyal M., Rohm D., Hosseini H. et al. A stochastic model for beaconless IEEE 802.15.4 MAC operation // Proceedings of the 12th international conference on Symposium on Performance Evaluation of Computer & Telecommunication Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2009. P. 199–207.
- [GUN 2007] Gun M., Kosar R., Ersoy C. Lifetime optimization using variable battery capacities and nonuniform density deployment in wireless sensor networks // Computer and information sciences, 2007. iscis 2007. 22nd international symposium on. 2007. P. 1–6.
- [GUS 2015] Guseynov Sharif E., Aleksejeva J.. Mthematical Modelling of Aquatic Ecosystem // Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. Volume III. Pp 92.-99. 2015.
- [HAL 2011] Halder S., Ghosal A., Chaudhuri A., DasBit S. A probability density function for energy-balanced lifetime-enhancing node deployment in WSN // Proceedings of the 2011 international conference on Computational science and its applications

- Volume Part IV. ICCSA'11. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. P. 472–487.
- [HAM 2009] Hammoodi I. S., Stewart B., Kocian A., McMeekin S. A Comprehensive Performance Study of OPNET Modeler for ZigBee Wireless Sensor Networks // Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, 2009. NGMAST '09. Third International Conference on. 2009. P. 357–362.
- [HEL 2006] Hellman K., Colagrosso M. Investigating a Wireless Sensor Network Optimal Lifetime Solution for Linear Topologies // Journal of Interconnection Networks. 2006. P. 91–100.
- [HIL 2005] Hillier F. S., Lieberman G. J. Introduction to Operations Research (8th ed.). Boston, MA: McGraw Hill, 2005.
- [HOL 2008] Holloway C.L., Young W.F., Koepke G., REmpley K.A., “Attenuation of Radio Wave Signals Coupled Into Twelve large Building Structures” // Electronics and Electrical Engineering Laboratory, Chalmers University of Technology, Sweden, 2008.
- [HU 2004] Hu X., Liu Y., Lee M., Saadawi T. N. A novel route update design for wireless sensor networks // ACM Mobile Computing and Communications Review. 2004. Vol. 8, no. 1. P. 18–26.
- [HWA 2004] Hwang K., In J., Yun Y., Eom D. Dynamic sink oriented tree algorithm for efficient target tracking of multiple mobile sink users in wide sensor fields // Proceedings of the 60th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2004-Fall. Vol. 7. Los Angeles, CA: 2004. P. 4607–4610.
- [HWA 2006] Hwang K., Eom D. Adaptive sink mobility management scheme for wireless sensor networks // Proceedings of the Third international conference on Ubiquitous Intelligence and Computing. UIC'06. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. P. 478–487.
- [IEE 2015] IEEE 802.15.4d-2009 standard [ONLINE] / Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2009. URL: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4d-2009.pdf> (Datums: 10.2012).
- [INT 2003] Intanagonwiwat C., Govindan R., Estrin D. et al. Directed diffusion for wireless sensor networking // IEEE/ACM Trans. Netw. 2003. Vol. 11, no. 1. P. 2–16.
- [JON 1999] Jonathan R. Agre, Loren P. Clare, Gregory J. Pottie, and Nikolai P. Romanov. Development platform for self-organizing wireless sensor networks. Unattended Ground Sensor Technologies and Applications, 3713(1):pp. 257–268, 1999.
- [JUR 2005] Jurenoks A.. Mobile Solutions in Transport Logistics. In: Proceedings of IST4Balt International workshop “IST 6th Framework Programme – Great opportunity for cooperation & collaboration”, 6-7 April, 2005, Riga, Latvia, ISBN 9984-32-178-
- [JUR 2006] Jurenoks A. Wireless communication technologies in multimedia systems. In: Scientific Proceedings of the Project eLOGMAR-M, 2006, ISBN: 9984-30-119-2, pp.151-155.
- [JUR 2007] Jurenoks A. , Rikure T. , Novickis L. , Šitikovs V. . e-Learning Environment Implementation in Riga 3rd Secondary School. In: Proceeding of International Project's IST4BALT “IST4Balt News Journal”, vol. 3, 2007, ISSN 1816-8701, pp.29- 30.
- [JUR 2008] Jurenoks A., Lavendels J., Šitikovs V.. Usage of e-Learning System UNITE in Informatics COurse of Secondary School. (European Project's Case Study). // In: Preceedings of International Conference “Distance Learning in Applied Informatics”, Slovakia, Nitra, May 2008, ISBN 978-80-8094-317-2, pp. 209-215.
- [JUR 2015] Jurenoks A., Novickis L.. Wireless Sensor Networks LifeTime Assessment Model Development. In: Preceedings of 10th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources”, Rezekne, Latvia, 2015. June, ISSN 1691-5402 (SCOPUS), pp. 121 – 126.

- [JUR 2015A] A. Jurenoks, L. Novickis. Wireless Sensor Network Live Circle Simulation Tools to Balance Energy Consumption in the Network Nodes. In: Preceedings of 29th European Simulation and Modelling Conference (ESM 2015), Leicester, Lielbritānija, 2015. gada 26. – 28. oktobris. ISBN 978-9077381-908, pp. 245 – 249.
- [KAH 1999] Kahn J. M., Katz R. H., Pister K. S. J. Next century challenges: mobile networking for "Smart Dust" // Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking. MobiCom '99. New York, NY, USA: ACM, 1999. P. 271–278.
- [KAN 2003] Kang I., Poovendran R. Maximizing static network lifetime of wireless broadcast ad hoc networks // Communications, 2003. ICC '03. IEEE International Conference on. Vol. 3. May. P. 2256–2261.
- [KAN 2004] Kansal A., Somasundara A., Jea D. et al. Intelligent fluid infrastructure for embedded networks // Proceedings of the 2nd ACM/SIGMOBILE International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobySys 2004. Boston, MA: 2004. P. 111–124.
- [KAN 2011] Kang Y., Lee J., Lee J., Cha J. A study for indoor position detection using LED QR code and smart-terminal // ICT Convergence (ICTC), 2011 International Conference on. 2011. P. 129–131.
- [KAR 2005] Karl H., Willig A. Protocols and Architecture for Wireless Sensor Networks. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- [KOT 2003] Kottapalli V. A. et al., "Two-Tiered Wireless Sensor Network Architecture for Structural Monitoring", In Proc. of 10th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego (USA), Mar. 2003.
- [KRI 2005] Krishnakumar A. S., Krishnan P. The theory and practice of signal strength-based location estimation // Collaborative Computing: Networking, Applications and Worksharing, 2005 International Conference on. P. 10 pp.–.
- [KUM 2004] Kumar S., Lai T. H., Balogh J. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network // Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking. MobiCom '04. New York, NY, USA: ACM, 2004. P. 144–158.
- [KUM 2005] Kumar S., Arora A., Lai T. On the lifetime analysis of always-on wireless sensor network applications // Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE International Conference on. 2005. P. 3 pp.–188.
- [KWO 2009] Kwon H., Seo H., Kim S., Lee B. G. Generalized CSMA/CA for OFDMA systems: protocol design, throughput analysis, and implementation issues // Wireless Communications, IEEE Transactions on. 2009. Vol. 8, no. 8. P. 4176–4187.
- [LAJ 2009] Lajevardi A., Haghighat A., Eghbali A. Extending directed diffusion routing algorithm to support sink mobility in wireless sensor networks // Communications (MICC), 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on. 2009. P. 541–546.
- [LAN 2003] LAN-MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LRWPANs), IEEE, 2003.
- [LAT 2015] Latvijas vides, ģeoloģijas un meteoroloģijas centrs. [ONLINE]. [Http://www.meteo.lv/](http://www.meteo.lv/) (Apskatīts: 07.2015)
- [LAW 2000] Law A. Kelton D., "Simulation modelling and analysis", third Edition. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [LP_ 2015] Lp_solve reference guide [ONLINE]. URL: <http://lpsolve.sourceforge.net/> (Datums: 03.2013).
- [LU 2004] Lu G., Krishnamachari B., Raghavendra C. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in wireless sensor networks // Parallel and Distributed Processing Symposium, 2004. Proceedings. 18th International. 2004. P. 224–231.

- [LUO 2014] Luo J., Hubaux J.-P. Joint Sink Mobility and Routing to Maximize the Lifetime of Wireless Sensor Networks: The Case of Constrained Mobility // *Networking, IEEE/ACM Transactions on*. June. Vol. 18, 2014 no. 3. P. 871–884.
- [MAI 2002] Mainwaring A., Polastre J., Szewczyk R., Culler D., Anderson J., “Wireless Sensor Network for Habitat Monitoring.” In *Proc. 1st ACM Int. Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, Atlanta, GE, pp. 88–97, September 2002.
- [MAN 1971] Mandelbrot, B.B. A Fast Fractional Gaussian Noise Generator / B.B. Mandelbrot // *Water Resources Research*. - June 1971. - Vol. 8. - N 3. - 543-553 pp.
- [MAU 2011] Mautz R., Tilch S. Survey of optical indoor positioning systems // *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2011 International Conference on. 2011. P. 1–7.
- [MCN 2002] McNeff J. The global positioning system // *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*. 2002. Vol. 50, no. 3. P. 645–652.
- [MEM 2015] MEMSIC Wireless Sensor Network tools [ONLINE]. URL: <http://www.memsic.com/wireless-sensor-networks/> (Datums: 06.2015).
- [MES 2007] Messier, G. Traffic Models for Medical Wireless Sensor Networks / G.G. Messier, I.G. Finvers // *IEEE Communications Letters*. - January 2007. - Vol. 11. - N 1. - 13-15 pp.
- [MHA 2005] Mhatre V. P., Rosenberg C., Kofman D. et al. A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint // *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2005. Vol. 4, no. 1. P. 4–15.
- [MIE 2012] Miežītis G., Zagurskis V., Taranovs R. Multiple Mobile Gateways in Wireless Sensor Networks // *RTU zinātniskie raksti. 5. series., Datorzinātne*. - 13. vol. (2012), pp 38.-42.
- [MIL 1960] Miller C. E., Tucker A. W., Zemlin R. A. Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems // *J. ACM*. 1960. Vol. 7, no. 4. P. 326–329.
- [MIS 2009] Misra S. et al. (eds.). *Guide to Wireless Sensor Networks, Computer Communications and Networks*, DOI: 10.1007/978-1-84882-218-4 4, Springer-Verlag London Limited 2009.
- [MOG 2010] Moghe R., Yang Yi, Lambert F., Divan D.. "Design of a low cost self powered “Stick-on” current and temperature wireless sensor for utility assets," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2010 IEEE, 2010, pp. 4453-4460.
- [MOH 2005] Mohammadi K., Hamidi H., "Evaluation of fault-tolerant mobile agents in distributed systems," *Proceeding of the first IEEE and IFIP International Conference in central Asia on Internet* 2005, 2005.
- [MUN 2009] Munz P., Hudea I., Imad J., Smith R., “Mathematical modelling of network structure”, *Proceeding in the Infectious Disease Modelling Research Progress*, ISBN 978-1-60741-347-9, pp.133-150, 2009.
- [NAO 2003] Naoumov V., Gross T., “Simulation of Large Ad Hoc Networks.” In *Proc. ACM Modeling, Analysis and Simulation of Wireles and Mobile Systems (MSWiM 2003)*, San Diego, CA, pp. 50–57, 2003.
- [NOV 2011] Novickis L., Matisiunas A., Rikure T., Jurenoks A.. Promotion of e-Learning Solution via Information Technology Transfer Concept and Baltic Regional Competence Network. In: *Preceeding of the International Conference “Virtual and Augmented Reality in Education” (VARE 2011)*, Vidzemes Augstskola, March 2011. 10p. (EBSCO).
- [NS- 2015] NS-3 modelēšanas sistēma[ONLINE]. URL:<http://www.nsnam.org> (Datums 05.2013).
- [NUR 2011] Nurul I. Sarkar and Syafnidar A. Halim,” A Review of Simulation of Telecommunication Networks: Simulators, lassification, Comparison, Methodologies, and Recommendations”, *Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT)*, March Edition, 2011

- [NXP 2015] NXP/Jennic wireless modules [ONLINE]. URL: <http://www.jennic.com/products/modules/> (Datums: 05.2013).
- [OPE 2015] open-ZB bibliotēka [ONLINE]. URL: <http://www.open-zb.net/> (Datums: 04.2013).
- [OPN 2015] OPNET modeller [ONLINE]. URL: http://www.opnet.com/solutions/network_rd/modeler.html (Datums: 05.2013).
- [OVČ 2013] Ovčinnikova Viktorija. Bezvadu sensoru tīklu modelēšana. Rīgas Tehniskā universitāte, Datorzinātnes un informācijas tehnoloģijas fakultāte, Jūnijs 2013.
- [PAW 2002] Pawlikowski K., Joshua Jeong H. D., Ruth Lee J. S. "On Credibility of Simulation Studies of Telecommunication Networks." IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 1, pp. 132–139, January 2002.
- [PER 1997] Perkins C. E., Royer E. M. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing // IN PROCEEDINGS OF THE 2ND IEEE WORKSHOP ON MOBILE COMPUTING SYSTEMS AND APPLICATIONS. 1997. P. 90–100.
- [POL 2004] Polastre J., Hill J., Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks // Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems. SenSys '04. New York, NY, USA: ACM, 2004. P. 95–107.
- [PU 2010] Pu F., Li C., Gao T. et al. Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Health Monitoring // Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International Conference on. 2010. P. 1–4.
- [QI 2001] Qi H., Iyengar S. S., Chakrabarty K., "Multiresolution Data Integration Using Mobile Agents in Distributed Sensor Networks," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C, 2001, pp.383-91.
- [RAG 2002] Raghunathan V., Schurgers C., Park S., Srivastava M., "Energy aware wireless microsensor networks", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 19, iss. 2, pp. 40–50, March 2002.
- [RAI 2005] Raicu I., Schwiebert L., Fowler S., Gupta E. K. S. Local load balancing for globally efficient routing in wireless sensor networks // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2005. Vol. 1. P. 2005.
- [RAK 2009] Rakhmatov D. Battery voltage modeling for portable systems // ACM Trans. Des. Autom. Electron. Syst. 2009. Vol. 14, no. 2. P. 29:1–29:36.
- [RAM 2012] Ramya K., Kumar K.P., Rao V.. A survey on target tracking techniques in wireless sensor networks. International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSSES), 3(4):pp. 93–108, August 2012.
- [RAY 1998] Rayleigh G., Cioffi J., "Spatio-temporal coding for wireless communication," IEEE Transactions on Communications, vol. 46, no. 3, pp. 357–366, March 1998.
- [RIK 2005] Rikure T., Jurenoks A., Latiševa E.. Wireless network technologies: security and e-learning applications („Bezvadu tehnoloģijas: drošība un e-mācīšanas lietojumi"). In: Scientific Proceedings of Riga Technical University, Computer Science Applied Computer System, Sērija 5, Sējums 22, Rīga 2005, ISSN: 1407-7493, pp.140-148 (EBSO, VINITI).
- [RIK 2005] Rikure T., Jurenoks A.. Wireless Network Technologies in Transport Area: Security and eLearning Applications. In: Proceedings of the International Conference IVETTA (Innovative Vocational Education and Training in the Transport Area) 2005, 24-25 February, 2005, Riga, Latvia, ISBN: 9984-9820-0-9, pp. 249-255.
- [SCH 2003] Schiller J. Mobile communications. Boston, MA: Addison-Wesley, 2003.
- [SEN 2010] Sengupta S., Rayanchu S., Banerjee S. Network Coding-Aware Routing in Wireless Networks // Networking, IEEE/ACM Transactions on. 2010. Vol. 18, no. 4. P. 1158–1170.
- [SHA 2003] Shah R. C., Roy S., Jain S., Brunette W. Data MULEs: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks // Proceedings of the First IEEE

- International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications, SNPA 2003. Anchorage: 2003. P. 30–41.
- [SIN 2010] Singh S.K., Singh M.P., Singh D.K.. "Energy-efficient Homogeneous Clustering Algorithm for Wireless Sensor Network", International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN), Aug. 2010, vol. 2, no. 3, pp. 49-61.
- [SOB 2005] Sobeih A., Chen W., Hou J. C., Kung L., Li N., Lim H., Tyan H., Zhang H., "J-Sim: A simulation and emulation environment for wireless sensor networks." In Proc. Annual Simulation Symposium (ANSS 2005), San Diego, CA, pp. 175–187, April 2005.
- [SOH 2000] Sohrabi, K. Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network / K. Sohrabi, J.Gao, V.Ailawadhi, G.J. Pottie // Personal Communications, IEEE. - October 2000. - Vol. 7. - N 5. - 16–27 pp.
- [SOR 2005] Soro S., Heinzelman W. B. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering // Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05). IPDPS '05. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2005. P. 236–243.
- [STA 2003] Stankovic J. et al. "Real-Time Communication and Coordination in Wireless Sensor Networks", In Proceedings of the IEEE, Vol. 91, N. 7, July 2003.
- [STA 2005] Stankovic J. A., Cao Q., Doan T., Fang L., He Z., Kiran R., Lin S., Son S., Stoleru R., Wood A.. Wireless Sensor Networks for In-Home Healthcare: Potential and Challenges. HCMDS, 2005.
- [SUN 2002] Sun J.-Z., Sauvola J. Mobility and mobility management: a conceptual framework // Networks, 2002. ICON 2002. 10th IEEE International Conference on. 2002. P. 205–210.
- [SUN 2006] Sun T., Chen L.-J., Han C.-C. et al. Measuring effective capacity of IEEE 802.15.4 beaconless mode // Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006. IEEE. Vol. 1. 2006. P. 493–498.
- [TAR 2012] Taranovs, R., Zagurskis, V., Miežītis, G. An Efficient Clustering Approach to Hierarchical Wireless Sensor Networks. *Datorvadības tehnoloģijas*. Nr.13, 2012, 43.-47.lpp. ISSN 2255-9108. e-ISSN 2255-9116.
- [TAR 2014] Taranovs, R., Jesilevskis, V., Miežītis, G., Bļizņuks, D., Kļaviņš, Ē., Kalniņš, A., Zagurskis, V. An Approach for Meeting Room Activity Monitoring and Analysis. *Datorvadības tehnoloģijas*. Nr.15, 2014, 63.-68.lpp. ISSN 2256-0343. e-ISSN 2256-0351.
- [ZAG 2007] Zagurskis, V., Zibiņ, D. Random Multiple Access Method for Wire and Wireless Local Networks. No: *Proceedings of 17th International Conference on Computer Theory and Applications (ICCTA2007)*, Ēģipte, Alexandria, 1.-3. septembris, 2007. Alexandria: Egipte Academy of Sciences, University of Alexandria, 2007, 173.-178.lpp.
- [ZAG 2006] Zagurskis V. Multimedia and Network Technology for Flexible and Distance Learning and Training // RTU zinātniskie raksti. 5. sēr., Datorzinātne. - [nav norādīts]. sēj. (2006), [nav norādīts].-[nav norādīts]. lpp.
- [БАН 1989] Банди Б. Основы линейного программирования. М.: Радио и связь, 1989. 176 с.
- [БАС 2009] Баскаков С. С. Исследование способов повышения эффективности маршрутизации по виртуальным координатам в беспроводных сенсорных сетях // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2009. № 2. С. 112–124.
- [ВАН 2010] Вабищевич А. Н. Определение положения в пространстве элементов беспроводной сенсорной сети с помощью инерциальных сенсоров // Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ 2010. М.: МИЭМ, 2010. С. 151–152.
- [ВАС 1988] Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач: Учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1988. 552 с.

- [ВИШ 2005] Вишневский В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
- [ГЕК 2006] Гекк М. В., Истомин Т. Е., Файзулхаков Я. Р., Чечендаев А. В. Адаптивный алгоритм быстрой доставки сообщений по выделенным направлениям для беспроводных сетей датчиков // Вестник молодых ученых "Ломоносов". Выпуск III. 2006. С. 55–60.
- [ЕФР 2007] Ефремов В. В., Маркман Г. З. "Энергосбережение" и "энергоэффективность": уточнение понятий, система сбалансированных показателей энергоэффективности // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 311, № 4. С. 146–148.
- [ЖДА 2009] Жданов В. С. Проблемы и задачи проектирования беспроводных сенсорных сетей // Информационные, сетевые и телекоммуникационные технологии: сборник научных трудов, под ред. проф. д.т.н. Жданова В.С. 2009. С. 8–21.
- [ИВА 2008] Иванов Е. В. Определение координат в беспроводных сенсорных сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. 2008. 149 с.
- [КОМ 2012] Комаров М. М. Разработка и исследование метода энергетической балансировки беспроводной стационарной сенсорной сети с автономными источниками питания: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. 2012. 125 с.
- [КОМ 2012] Комаров М. М., Восков Л. С. Позиционирование датчиков беспроводной сети как способ энергосбережения // Датчики и системы. 2012. Т. 1. С. 34–38.
- [КУР 2011] Курпатов Р. О. Исследование и разработка энергоэффективного метода локализации элементов беспроводных сенсорных сетей: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. М., 2011. 126 с.
- [МУД 1969] Мудров В. И. Задача о коммивояжере. М.: Знание, 1969. 62 с.
- [ОЛИ 2010] Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 4-е издание, 2010. 943 с.
- [ЮРК 2012] Юркин В. Ю., Мохсени Т. И. Иерархические подходы к самоорганизации в беспроводных широкополосных сенсорных сетях на основе хаотических радиоимпульсов // Труды МФТИ. 2012. Т. 4, № 3. С. 151–161.